



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física

ACTIVIDAD EN RAYOS GAMMA PARA UNA MUESTRA DE BLAZARES

Joselyn Mabel Osorio Archila

Asesorada por José Rodrigo Sacahui Reyes y Antonio Marinelli

Guatemala, Marzo 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**ACTIVIDAD EN RAYOS GAMMA PARA UNA
MUESTRA DE BLAZARES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JEFATURA DEL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POR

JOSELYN MABEL OSORIO ARCHILA
ASESORADA POR JOSÉ RODRIGO SACAHI REYES Y ANTONIO
MARINELLI

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, MARZO 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



CONSEJO DIRECTIVO

DIRECTOR M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
SECRETARIO ACADÉMICO M.Sc. Edgar Anibal Cifuentes Anléu

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR Dra. Maria Eugenia Cabrera Catalán
EXAMINADOR M.Sc. Juan Diego Chi-Wen Chang Santizo
EXAMINADOR Dr. David Fernando Marín Roma



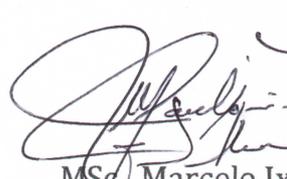
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



Ref. D.DTG. 001-2019
Guatemala 28 de febrero de 2019

El Director de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Coordinador de la Licenciatura en Física Aplicada, al trabajo de graduación Titulado: **ACTIVIDAD EN RAYOS GAMMA PARA UNA MUESTRA DE BLAZERS** presentado por la estudiante universitaria **Joselyn Mabel Osorio Archila**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE.



MSc. Marcelo Ixquiac

Director

Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas

AGRADECIMIENTOS

A mi abuela que sin ella no estuviera aquí, por haberme enseñado la dulzura y por darme el ejemplo de una vida resiliente.

A mis padres por su apoyo incondicional, porque sin ustedes nada de esto hubiera sido posible. A mi madre por sembrar en mí la semilla de la curiosidad. A mi padre por inculcarme el gusto al trabajo duro.

A mis hermanos, sobrinos y Nicolás por siempre estar cuando los necesito.

A mis profesores por tantas enseñanzas académicas y también personales.

A mis amigos por hacer de esta experiencia mucho más fácil. Por brindarme toda su ayuda y palabras de ánimo y motivación.

A mis asesores Rodrigo Sacahui y Antonio Marinelli por otorgarme su tiempo en mi formación en astronomía. A mi asesor Rodrigo Sacahui por toda la ayuda, la paciencia y por haber creído en mí desde el inicio.

Para Ros Mery y Fernando

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. Nucleos Galácticos Activos	1
1.1. Modelo de Unificación	4
1.2. Clases de AGNs	5
1.3. Distribución espectral de energía de la muestra SED de blazares	7
1.4. Blazares	10
1.4.1. Tipos de Blazares	11
1.5. Características de Blazares	13
1.5.1. Variabilidad	13
1.5.2. Chorro relativista	14
1.5.3. Efecto Faro Relativista	16
1.5.4. Movimiento Superlumínico	17
1.6. Modelos de producción de rayos gamma en Blazares	18
1.6.1. Modelo leptónico	18
1.6.2. Modelo hadrónico	19
1.7. Nucleos Galácticos Activos y Neutrinos	21
2. Instrumentos de observación y catálogo	23
2.1. Fermi-LAT	23
2.1.1. Hardware LAT	24
2.1.1.1. Descripción técnica:	24
2.1.2. Software LAT: Fermi Science Tools	31
2.1.2.1. Centro de Operación Científica del Instrumento (ISCO)	31

2.1.2.2.	Proceso científico automatizado (ASP)	32
2.1.2.3.	Análisis Agrupado de Máxima Verosimilitud.	32
2.1.2.4.	Estadística de prueba (TS)	33
2.1.2.5.	Preparación de datos	33
2.1.2.6.	Mapas de conteo	34
2.1.2.7.	Mapas de exposición	35
2.1.2.8.	Mapa fuente	35
2.1.2.9.	Análisis de Verosimilitud con Gtlike	35
2.1.3.	Enrico	36
2.2.	IceCube	38
2.2.1.	Mecanismo	39
2.3.	Tercer Catálogo de Fermi LAT	41
2.3.1.	Procedimiento de selección	42
2.3.2.	Clasificación de fuentes	43
2.3.2.1.	Clasificación óptica	43
2.3.2.2.	Clasificación por la distribución espectral (SED)	44
2.3.3.	Propiedades de fuentes	46
2.3.3.1.	Índice espectral de fotones (Γ_p)	46
2.3.3.2.	Corrimiento al rojo (z)	46
2.3.3.3.	Luminosidad	47
2.3.3.4.	Curvatura del espectro	47
2.3.3.5.	Variabilidad	47
3.	Muestra	49
3.1.	Markarian 421 (Mkn 421)	49
3.2.	TXS 0506+056	51
3.3.	OP 313	53
3.4.	3C 279	54
3.5.	Ciclo de actividad	57
3.5.1.	Criterio propuesto por Vercellone et al. [2004]	58
3.5.2.	Criterio de zonas inactivas	59
3.5.3.	Criterio Tluczykont et al. [2007]	59
3.5.4.	Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]	63
3.6.	Distribución espectral de energías	64

4. Resultados y discusión de resultados	67
4.1. Mkn421	67
4.1.1. Criterio propuesto por Vercellone et al. [2004].	67
4.1.2. Criterio de zonas inactivas	68
4.1.3. Criterio de Tluczykont et al. [2007]	70
4.1.4. Criterio combinación de Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007]	73
4.1.5. Tabla resumen Mkn 421	74
4.2. TXS 0506+056	77
4.2.1. Tabla resumen TXS 0506+056	78
4.3. OP 313	81
4.3.1. Tabla resumen OP 313	82
4.4. 3C 279	85
4.4.1. Tabla resumen 3C 279	86
4.5. Discusión	89
 CONCLUSIONES	 93
 RECOMENDACIONES	 95
 A. Apéndice: Resultados completos	 107
A.1. Mkn421	107
A.2. TXS 0506+056	112
A.2.1. Criterio Vercellone et al. [2004]	112
A.2.2. Criterio zonas inactivas	113
A.2.3. Criterio Tluczykont et al. [2007]	114
A.2.4. Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]	119
A.3. OP 313	120
A.3.1. Criterio Vercellone et al. [2004]	120
A.3.2. Criterio zonas inactivas	121
A.3.3. Criterio Tluczykont et al. [2007]	122
A.3.4. Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]	127
A.4. 3C 279	128
A.4.1. Criterio Vercellone et al. [2004]	128
A.4.2. Criterio zonas inactivas	129
A.4.3. Criterio Tluczykont et al. [2007]	130
A.4.4. Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]	135

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Diagrama de la estructura de los AGNs.	3
1.2.	Taxonomía de los AGNs.	5
1.3.	Esquema de unificación de AGNs.	7
1.4.	La distribución espectral de energías con el modelo SSC.	8
1.5.	Modelos de EBL.	10
1.6.	Espectro histórico de Mkn 421.	11
1.7.	Variabilidad del blazar FSRQ 3C 279 en rayos gamma observados con Fermi LAT.	14
1.8.	Esquema para demostrar el movimiento superlumínico.	17
1.9.	Ilustración de la emisión de radiación vía efecto sincrotrón.	19
1.10.	Ilustración de la Emisión Compton Autoinducida por medio del efecto Compton Inverso.	20
2.1.	Esquema de el telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi.	24
2.2.	Diagrama de Fermi LAT.	25
2.3.	Ilustración del diseño interior de LAT.	25
2.4.	Diagrama del rastreador de trayectorias de los pares e^-e^+ creados.	28
2.5.	Esquema jerárquico del Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) de LAT.	30
2.6.	Esquema del observatorio IceCube.	39
2.7.	Histogramas de la distribución de blazares respecto el tipo espectral.	45
3.1.	Gráfico de la curva de luz de Markarian 421.	50
3.2.	Distribución espectral multifrecuencia de Mkn 421.	51
3.3.	Curva de luz del blazar TXS 0506+056.	52
3.4.	Distribución espectral histórica de TXS 0506+056.	53
3.5.	Curva de luz de OP 313.	54
3.6.	Distribución espectral de OP 313.	55

3.7. Curva de luz del blazar 3C279 de 10 años de observación de Fermi LAT.	56
3.8. Distribución espectral multifrecuencia de 3C279.	56
3.9. Curva de luz de Mkn 421 con el umbral de Vercellone et al. [2004].	58
3.10. Curva de luz de Mkn 421 con el criterio de valor medio en fases de inactividad.	59
3.11. Histograma de flujos del blazar Mkn 421.	60
3.12. Ciclo de actividad del Blazar Mkn 421 por Tluczykont et al. [2007].	62
3.13. Curva de luz de Mkn 421 con el criterio de Tluczykont et al. [2007]	63
3.14. Curva de luz del blazar OP 313 con corrección EBL y sin corrección EBL.	65
4.1. Hisograma de frecuencias de flujos del blazar Mkn 421.	70
4.2. El ciclo de actividad de Mkn 421 con episodio temporal de 2 semanas con contribución EBL.	71
4.3. Curvas de luz de Mkn 421 con episodios temporales de 2 semanas mostrando umbrales de actividad.	75
4.4. Resultados para el ciclo de actividad del blazar Mkn 421 con los 4 criterios usados.	76
4.5. Distribución espectral de energías de Mkn 421.	77
4.6. Curva de luz del blazar TXS0506+056 con los umbrales de actividad usados.	79
4.7. Ciclo de actividad del blazar TXS 0506+056 con los cuatro criterios.	80
4.8. Distribución espectral de energías de TXS 0506+056.	81
4.9. Curva de luz del blazar OP 313 con los umbrales de actividad usados.	83
4.10. Ciclo de actividad del blazar OP 313 con los cuatro criterios.	84
4.11. Distribución espectral de energías de OP 313.	85
4.12. Curva de luz del blazar 3C 279 con los umbrales de actividad usados.	87
4.13. Ciclo de actividad de 3C 279 con los 4 criterios usados.	88
4.14. Distribución espectral de energías de 3C 279.	89
A.1. Histogramas del blazar Mkn 421 con los 4 episodios temporales con el modelo EBL.	108
A.2. Histogramas del blazar Mkn 421 con los 4 episodios temporales sin modelo EBL.	109
A.3. Ciclos de actividad de Mkn 421 con modelo EBL.	110
A.4. Ciclos de actividad de Mkn 421 sin modelo EBL.	111

A.5. Histogramas del blazar TXS 0506+956 con los 4 episodios temporales con modelo EBL.	115
A.6. Histogramas del blazar TXS 0506+956 con los 4 episodios temporales sin modelo EBL.	116
A.7. Ciclos de actividad de TXS 0506+956 con modelo EBL.	117
A.8. Ciclos de actividad de TXS 0506+956 sin modelo EBL.	118
A.9. Histogramas del blazar OP 313 con los 4 episodios temporales con modelo EBL.	123
A.10. Histogramas del blazar OP 313 con los 4 episodios temporales sin modelo EBL.	124
A.11. Ciclos de actividad de OP 313 con modelo EBL.	125
A.12. Ciclos de actividad de OP 313 sin modelo EBL.	126
A.13. Histogramas del blazar 3C 279 con 2 episodios temporales con modelo EBL.	131
A.14. Histogramas del blazar 3C 279 con 3 episodios temporales sin modelo EBL.	132
A.15. Ciclos de actividad de 3C 279 con 2 episodios temporales con el modelo EBL.	133
A.16. Ciclos de actividad de 3C 279 sin modelo EBL.	134

ÍNDICE DE TABLAS

1.1.	Diferencias entre blazares FSRQ y BL Lac.	12
4.1.	Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar Mkn 421.	68
4.2.	Tabla de resultados del criterio de zonas inactivas del blazar Mkn 421.	69
4.3.	Tabla de datos del blazar Mkn 421 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007].	72
4.4.	Tabla de datos del blazar Mkn 421 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007].	73
4.5.	Tabla de datos recopilados del blazar Mkn 421 para episodios temporales de dos semanas.	74
4.6.	Resultados para el ciclo de actividad del blazar TXS 0506+056 con los 4 criterios usados.	78
4.7.	Resultados para el ciclo de actividad del blazar OP 313 con los 4 criterios usados.	82
4.8.	Resultados para el ciclo de actividad del blazar 3C 279 con los 4 criterios usados.	86
4.9.	Características de las fuentes de la muestra.	90
A.1.	Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar TXS 0506+056.	112
A.2.	Tabla de resultados del criterio de zonas inactivas del blazar TXS 0506+056.	113
A.3.	Tabla de datos del blazar TXS 0506+056 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007].	114
A.4.	Tabla de datos del blazar TXS 0506+056 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007].	119
A.5.	Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar OP 313.	120

A.6. Tabla de resultados del criterio de zonas inactivas del blazar OP 313.	121
A.7. Tabla de datos del blazar OP 313 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007].	122
A.8. Tabla de datos del blazar OP 313 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007].	127
A.9. Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Verce- llone et al. [2004] para el blazar 3C 279.	128
A.10. Tabla de resultados del criterio de zonas inactivas del blazar 3C 279.	129
A.11. Tabla de datos del blazar 3C 279 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007].	130
A.12. Tabla de datos del blazar 3C 279 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007].	135

OBJETIVOS

General

Obtener el ciclo de trabajo de una muestra de 4 blazares con diferentes características físicas.

Específicos

1. Utilizar diferentes criterios de definición de fase activa para estimar el ciclo de actividad en las fuentes de la muestra.
2. Obtener el ciclo de actividad con diferentes tamaños de episodios temporales.
3. Obtener los ciclos de actividad de los blazares TXS 0506+056 y OP 313 que son candidatos a emisión de neutrinos astrofísicos.
4. Reconstruir las curvas de luz con corrección de la luz de fondo extragaláctica (EBL) y sin corrección de EBL.
5. Analizar si existen diferencias entre los ciclos de actividad considerando la contribución de EBL.

INTRODUCCIÓN

Los Núcleos Galácticos Activos (AGNs, por sus siglas en inglés) han sido, desde su detección, objetos astrofísicos de mucho interés dado que presentan características distintivas como altas luminosidades en volúmenes concentrados, una distribución espectral de energía (SED) caracterizada por dos picos y una emisión anisotrópica causada por su estructura. El modelo más aceptado actualmente propone que entre las partes que conforman un AGN se encuentra un agujero negro supermasivo en su centro con un disco de acreción al rededor, seguido por una distribución de gas y polvo en forma de toroide y dos chorros que se emanan perpendicularmente al plano del disco de acreción.

Existen diferentes tipos de AGNs los cuales presentan algunas características en común y se sabe que tienen una estructura que emite radiación de forma no isotrópica. Urry and Padovani [1995] propone el modelo por orientación en donde estipula que estos objetos son lo mismo pero se diferencia en función de la región de observación ya que con cada tipo se obtienen características distintivas.

Cuando el chorro del AGN se dirige al observador con un ángulo pequeño o nulo se tiene un AGN tipo blazar; por lo tanto por medio de los blazares se puede estudiar el comportamiento y la naturaleza de los chorros. Los blazares presentan emisiones no térmicas en todo el espectro electromagnético en especial en radio, rayos X y rayos gamma y muestran una rápida variabilidad en varias de estas frecuencias en escalas de tiempo de minutos a meses.

En el presente trabajo de tesis se hace un estudio de actividad en una muestra de cuatro blazares: Mkn 421, TXS 0506+056, OP 313 y 3C 279, por medio del ciclo de actividad, esta cantidad es la fracción de tiempo en que la fuente pasa activa respecto el tiempo total de observación. Los datos se obtuvieron por medio de la misión Fermi usando el instrumento Large Area Telescope (LAT) a una energía de

100MeV a 300GeV.

Las fuentes de la muestra presentan varias características que las diferencian entre sí, por ejemplo, los blazares TXS 0506+056 y OP 313 presentan una coincidencia espacial de eventos de neutrino observados por el detector de neutrinos IceCube y en particular TXS 0506+056 presenta un aumento de actividad en rayos gamma en coincidencia con la detección del neutrino 170922A. Los otros dos objetos, Mkn 421 y 3C279 son fuentes muy estudiadas y no presentan coincidencia de neutrinos sin embargo son muy brillantes y muy activos.

La estructura de este trabajo está organizada iniciando con el capítulo 1 que presenta los conceptos generales de AGNs y sus clases, detalla acerca de blazares, sus tipos y sus características. En el capítulo 2 se presenta los instrumentos de observación; en primer lugar a Fermi LAT con el cual se obtienen los datos para el análisis y luego a IceCube quien observa los eventos de neutrinos, en este capítulo también se describe el tercer catálogo de AGNs de Fermi LAT (3LAC) el cual reporta los objetos de la muestra. En el capítulo 3 se detallan las fuentes de la muestra y se da una descripción de la metodología usada para la medición del ciclo de actividad con cuatro criterios de actividad diferentes. En el capítulo 4 se presentan los resultados del ciclo de actividad para los diferentes criterios, en cuatro episodios temporales (3 meses, 1 mes, 2 semanas y 1 semana) con una corrección EBL del modelo de Franceschini y sin la corrección del modelo EBL.

1. Nucleos Galácticos Activos

Los Núcleos Galácticos Activos (AGNs por sus siglas en inglés) son regiones compactos en el centro de una galaxia cuya luminosidad es mucho mayor que el resto de la misma. Fue a principios del siglo XX que empezaron las primeras observaciones espectroscópicas y ópticas que harían fijar la vista en las galaxias activas. En 1909, Edward Fath hizo un estudio espectral del núcleo de objetos brillantes los cuales en su momento se consideraron como nebulosas y cúmulos globulares tales como Messier 77 y Messier 81, en las que notó líneas anchas de emisión en su centro [Fath, 1909]. En 1918, Herber Curtis observó el primer chorro en Messier 87, conocida entonces como una nebulosa espiral¹ [Curtis, 1918]. En 1943, el astrónomo estadounidense Carl Seyfert publicó un estudio con una muestra de 6 galaxias espirales las cuales presentaron líneas de emisión anchas y de alta ionización [Seyfert, 1943], siendo este un indicio que los objetos observados por Fath [1909] y Curtis [1918] no eran nebulosas sino galaxias. Las galaxias Seyfert son nombradas en honor a Carl Seyfert por ser pionero en el estudio de estos objetos. Sin embargo una definición exacta de estas fuentes no se conocía hasta el desarrollo de la radio astronomía, en donde se observó que estos objetos emitían grandes cantidades de radiación en varias frecuencias pero la fuente no se localizaba ópticamente, sólo en algunos casos un objeto débil de forma puntual se observaba.

La apariencia puntual de los núcleos galácticos denota al aspecto de una estrella lejana, pero al ser estudiadas, revelan características distintivas, como el ensanchamiento de las líneas de emisión del hidrógeno [Cannon, 2012] o la alta luminosidad comparada a la de su galaxia anfitriona. La naturaleza de su fuerte emisión ha tenido varias explicaciones, una hipótesis fue la asunción de que se componía de un número muy grande de estrellas en el centro, otra, más acertada, que en el centro residía un objeto de tipo estelar de muy grande masa quien emitiría radiación principalmente por procesos de acreción de un disco de gas a su alrededor. El concepto

¹Lo que se creía eran nebulosas en forma espiral, ahora se sabe que son galaxias.

de AGN fue primero planteado por el Profesor Victor Ambartsumian en la década de los 50s. Ambartsumian [1998] postuló que la expulsión de grandes cantidades de masa tomaban lugar en el centro de los núcleos. La idea de que un agujero negro estaba en lugar de la estrella masiva fue propuesto hasta el año 1964 por Zeilik [2002].

El agujero negro supermasivo de $\sim 10^6$ - $10^9 M_{\odot}$ (donde M_{\odot} es una masa solar) que habita en el centro de estos objetos explica, no sólo la energía que se emana por medio del potencial gravitacional a través de acreción de materia, además explica el volumen reducido de las regiones de emisión lo cual es necesario para explicar la rápida variabilidad observada ya que esta propiedad está asociada a su tamaño, fuentes pequeñas presentan variaciones rápidas de flujo, mientras que la fuentes grandes tienen una variación de flujo a escalas de tiempo mayores. Esto está bien establecido mediante medidas directas por medio de observaciones en radio hechas por el VLBI (Very-Long-Baseline Interferometry) [Heeschen et al., 1987].

Una característica que llama la atención de los AGNs es la observación de líneas anchas o estrechas de emisión en su espectro. Al ser vistas por primera vez, en las galaxias tipo Seyfert, estas no correspondían en totalidad a ninguna longitud de onda de alguna línea conocida de origen astronómico, como las líneas de la serie de Balmer del hidrógeno que se mostraban más anchas (hasta 8500 km s^{-1}) [Seyfert, 1943] y aunque estas líneas no eran iguales entre fuentes, se hizo evidente que eran características típicas de AGNs. En su estudio se notó que las líneas anchas y las líneas estrechas de emisión provenían de regiones diferentes de los AGNs y que estas describían propiedades físicas de la región. Las líneas anchas del orden de 10^3 km s^{-1} [Véron-Cetty and Véron, 2000] provienen de regiones de materia cercana al agujero negro $\sim 2 - 20 \times 10^{16} \text{ cm}$ y predicen la masa del agujero negro a través del mapeo de reverberación²; con las líneas estrechas del orden de 10^2 km s^{-1} [Véron-Cetty and Véron, 2000] que se originan en regiones más lejanas al agujero negro localizadas aproximadamente a una distancia de 10^{18} a 10^{20} cm al rededor del centro y con velocidades menores, se infiere las distribuciones de gas y polvo en las regiones cercanas al centro de la galaxia [Urry and Padovani, 1995].

La naturaleza física de las líneas se explica por medio del ensanchamiento Doppler. Desde un marco de referencia en reposo, el espectro de la materia que se mueve acer-

²Mapeo de reverberación: es una técnica para medir la masa de un objeto central sabiendo la velocidad de un objeto, más pequeño, que lo orbita.

cándose y alejándose tendrá un efecto Doppler de corrimiento al azul y corrimiento al rojo, respectivamente. La materia que se mueve a velocidades mayores tendrá en su espectro un ensanchamiento Doppler más notorio y como resultado líneas de emisión -o absorción- más anchas [Gaskell, 2009].

Además de un agujero negro super masivo y de las regiones emisoras de líneas anchas y estrechas, otras partes que forman los AGNs son un disco de acreción formado por polvo, gas y ocasionalmente estrellas que rodea al agujero negro; una distribución de gas y polvo en forma de toroide con un radio interior de aproximadamente $\sim 10^{17}$ cm [Urry and Padovani, 1995] que se encuentra en la periferia del disco de acreción y opaca la emisión UV y de radio en su eje de visión; y un par de chorros (en ocasiones sólo un chorro) que son la emanación de flujos bipolares en el centro, formando un ángulo de $\sim 90^\circ$ respecto del plano del disco de acreción del agujero negro. Los chorros se crean como resultado de la acreción de materia hacia el agujero negro (Ver diagrama 1.1), los cuales se han observado en escalas desde 10^{17} hasta 10^{24} cm [Urry and Padovani, 1995] y se componen de materia relativista y de fotones de alta energía (desde rayos X suaves hasta rayos gamma de TeV).

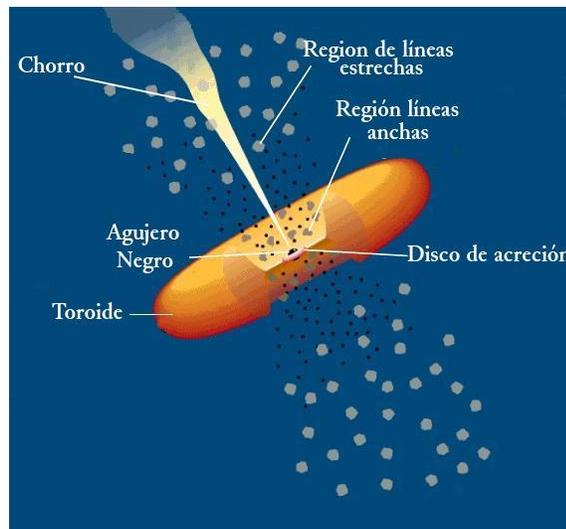


Figura 1.1. Diagrama de la estructura de los AGNs. [Urry and Padovani, 1995]

La emisión no térmica de los AGNs es anisotrópica dado a la forma y a la naturaleza de los chorros y del toroide, respectivamente. Esta emisión da la pauta para dividir los AGNs dependiendo del ángulo en donde se observen. Los tipos de

AGNs son los Seyfert I y Seyfert II, las radio galaxias, los cuásares y los blazares.

1.1. Modelo de Unificación

El modelo de unificación por orientación postulado por Urry and Padovani [1995] propone que la apariencia de los AGNs depende de su orientación y que su clasificación se basa, principalmente, en la región expuesta al observador. El oscurecimiento del toroide a sus partes centrales, el efecto Faro Relativista (Relativistic Beaming en inglés) de los chorros, o qué tanta región de líneas anchas o estrechas se está observando son los que marcan las diferencias entre tipos de AGNs de este modelo de unificación. Sin embargo características intrínsecas o naturales de la fuente como su emisión en radio hacen la primera clasificación de AGNs.

La emisión en radio de los AGNs está relacionada al tipo de galaxia que habitan o al espín del agujero negro. Existen dos tipos de clases de AGNs en función de su emisión de radio, si presenta emisión alta se conoce como radio ruidosos o radio loud en inglés y si presenta emisión en radio lánguida son conocidas como radio callados o radio quiet los cuales comprenden entre el 85 % al 95 % de la totalidad de AGNs [Dermer and Schlickeiser, 1994]. Las principales distinciones entre los AGNs radio ruidosos y radio callados son (1) los objetos radio ruidosos producen chorros a grandes escalas y lóbulos con fuerte emisión en radio y la luminosidad del chorro aporta una fracción significativa a la luminosidad total de la fuente, por otro lado, los chorros de los radio callados no son tan luminosos y no contribuyen significativamente a la emisión total del AGN. (2) Los objetos radio ruidosos son asociados a galaxias elípticas mientras los radio callados generalmente habitan galaxias espirales como anfitrionas. (3) El ambiente o la densidad del espacio que habitan los radio ruidosos es ~ 10 veces menor que para los radio callados [Wilson and Colbert, 1994].

La posterior clasificación de AGNs se basa en la orientación y en las características del espectro óptico y ultravioleta (ver figura 1.2). Los AGNs se separan en tres tipos: Aquellos AGNs con líneas de emisión anchas que provienen de gas caliente moviéndose rápidamente cerca del centro del agujero negro son los de Tipo I. Los de Tipo II tienen líneas de emisión estrechas, lo que podría significar que el gas no se mueve muy rápidamente pues está más alejado del agujero negro y por lo tanto la atracción gravitacional es menor, o que el gas está siendo oscurecido por una distribución de material como el toroide que absorbe emisiones generadas en el

centro. Por último, los AGN Tipo 0 son un pequeño número de AGNs que tienen un espectro diferente al de los tipos I y II, y que se especula que su ángulo de visión es muy pequeño -o nulo- al eje de simetría (el eje del chorro). El espectro de los AGN Tipo 0 no presenta ninguna línea de emisión o, si tiene algunas, son muy estrechas [Urry and Padovani, 1995].

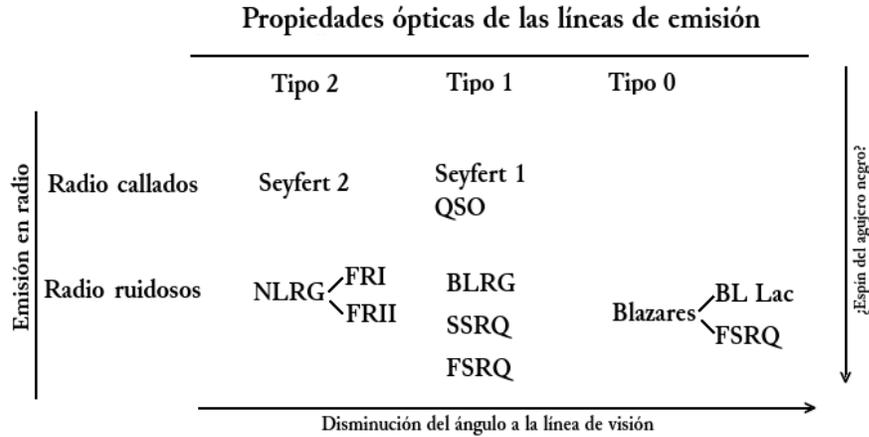


Figura 1.2. Taxonomía de los AGNs. Se presentan los 3 tipos de AGNs dependiendo de si presentan líneas de emisión o de la morfología de estas [Urry and Padovani, 1995].

A continuación se enlista las clases de AGNs dependiendo de su luminosidad, de su emisión en radio y de su región de observación.

1.2. Clases de AGNs

Los AGNs Tipo I, radio callados, de luminosidad baja ($\sim 3 \times 10^{45} \text{erg s}^{-1}$) son los Seyfert I [Hopkins et al., 2009], se encuentran solamente a distancias cercanas a la Tierra con corrimientos al rojo bajos ($z \lesssim 0.2-0.4$) [Pérez, 2012], por lo tanto su galaxia anfitriona puede ser reconocida. Los de luminosidad alta ($\sim 3 \times 10^{47} \text{erg s}^{-1}$) son los cuasáres radio callados (QSO, Quasi Stellar Objects), quienes se encuentran a distancias mayores por lo que raramente se puede estudiar la galaxia donde habitan [Hopkins et al., 2009]. Los AGNs radio ruidosos de Tipo I de baja luminosidad son las Radio Galaxias de Líneas Anchas o BLRG como sus siglas en inglés (Broad Line Radio Galaxies), mientras los de alta luminosidad pueden ser los SSRQ (Steep Spectrum Radio Quasars) o los FSRQ (Flat Spectrum Radio Quasar) en función de sus características espectrales en radio [Urry and Padovani, 1995].

En el Tipo II de AGNs radio callados se encuentran los Seyfert II con luminosidad baja. La contraparte de luminosidad alta no es identificada claramente en la actualidad. En los radio ruidosos de Tipo II se tienen las Radio Galaxias de Líneas Estrechas o NLRG (por sus siglas en inglés Narrow Line Radio Galaxies) que incluyen dos morfologías diferentes en radio [Fanaroff and Riley, 1974]: las Fanaroff-Riley tipo I y las Fanaroff-Riley tipo II. Las radio galaxias de Fanaroff-Riley I (FRI) son de luminosidad baja, tienen chorros generalmente simétricos cuya intensidad decae a medida que se alejan del núcleo y están rodeados de lóbulos que son fuertes emisores en radio. La galaxia anfitriona es generalmente elíptica y se encuentran en cúmulos de galaxias con gas emitiendo en rayos X. Las radio galaxias de Fanaroff-Riley II (FRII) con altas luminosidades, tienen chorros más colimados y constituyen menos del 10 % de las radio galaxias pero la mayoría de cuásares. Las FRII se asocian con galaxias que tienen regiones extensas de emisión nuclear y de líneas. Estas galaxias son elípticas gigantes [Pérez, 2012].

En el Tipo 0 de AGNs radio ruidosos se tienen a los BL Lacertae³ (o BL Lac, de ahora en adelante) que carecen totalmente de líneas de emisión o absorción en su espectro o presentan líneas muy estrechas. Los BL Lac usualmente son asociados a los objetos OVV (Optical Violently Variable). Por otro lado, los Highly Polarized Quasars (HPQ); los Core-Dominated Quasars (CDQ) y los FSRQ son objetos que probablemente se encuentren un ángulo pequeño del eje de visión y su emisión continua se asemeja en gran medida al de los BL Lac, también están caracterizados por una rápida variabilidad, alta y variable polarización, altas temperaturas de brillo ($T \sim 10^{12} \text{K}$) y velocidades superlumínicas [Quirrenbach et al., 1992]. A este subconjunto se le llamará en general como FSRQ. Por lo tanto, los AGNs de Tipo 0 radio ruidosos se dividen en BL Lac y FSRQ que en conjunto se conocen como blazares. Los AGNs de Tipo 0, radio callados no se conocen hasta la fecha de realización de este trabajo.

³Se nombraron BL Lacertae o BL Lac para más corto por el objeto que lleva el mismo nombre, detectado en 1968 y que se confundió con una estrella variable. BL Lacertae fue el primer BL Lac descubierto [Schmitt, 1968].

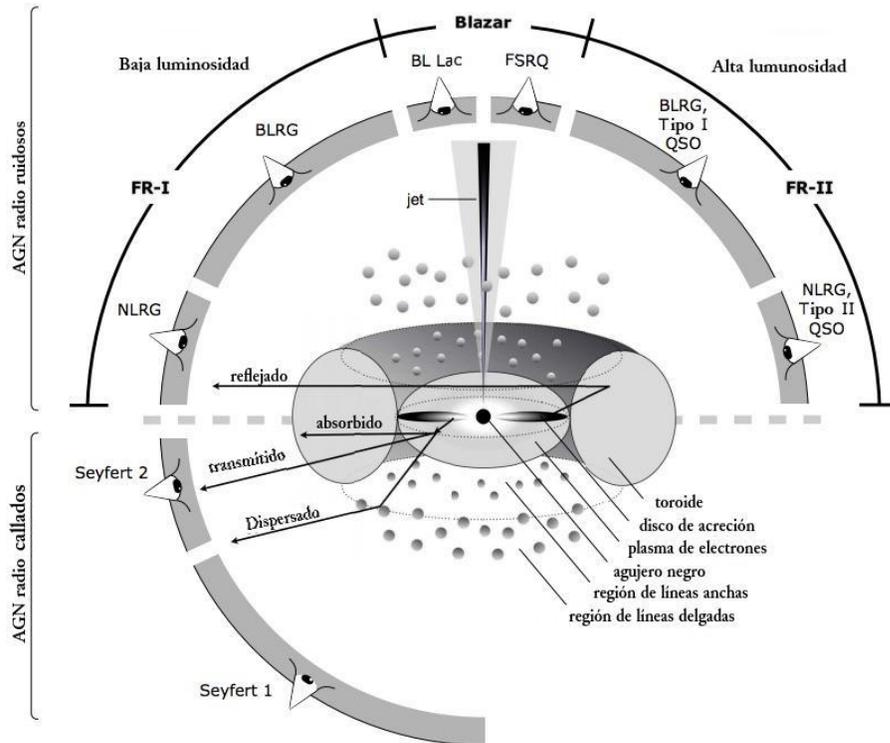


Figura 1.3. Se muestra la región de observación de todos los tipos de AGNs mencionados. El esquema se divide en dos (por la línea no continua horizontal), en la parte de abajo están los AGNs radio callados donde se encuentran las Seyfert I y II. En la parte de arriba están los AGNs radio ruidosos. A la izquierda están las fuentes FR-I de baja luminosidad, a la derecha los FR-II de alta luminosidad y arriba están los blazares BL Lac y FSRQ muy cerca o justamente en el eje del chorro [Antonucci, 1993]

A manera de resumen, los tipos de AGNs conocidos hasta ahora son en radio callados los Seyfert I y Seyfert II; en radio ruidosos están las Radio Galaxias, los Cuásares y los Blazares. Un esquema del modelo por orientación de clasificación de AGNs puede verse en la figura 1.3.

1.3. Distribución espectral de energía de la muestra SED de blazares

Los AGNs son objetos muy estudiados ya que tienen emisiones en todo el espectro electromagnético, son candidatos a emisores de rayos cósmicos ultraenergéticos y son unas de las fuentes más brillantes del cielo en rayos gamma de GeV y TeV. La distribución espectral se reproduce, al menos en una primera aproximación, por un modelo de emisión Synchrotron Self Compton (SSC) compuesto por un componente

sincrotrón para el pico de bajas energías, entre infrarrojo y rayos X suaves, y un componente Compton Inverso para el pico de altas energías desde rayos X hasta rayos gamma de GeV hasta de TeV (ver sección 1.6). Blazares con el primer pico en infrarrojo son los LSP, y blazares con el pico sincrotrón en la banda de rayos X son HSP como se muestra en la figura 1.5 (ver sección 1.4.1).

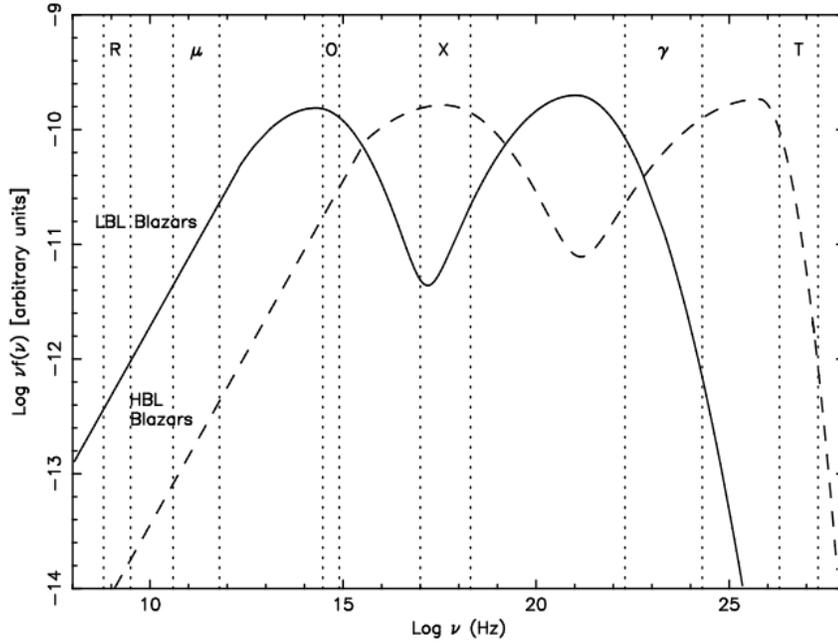


Figura 1.4. La distribución espectral de energías para blazares tipos LSP y HSP, representados por el modelo SSC (ref: [Giommi et al., 2006]).

A pesar de tener baja densidad en su ambiente al rededor, los blazares presentan fuertes emisiones en todo el espectro electromagnético, esto los hace contribuyentes significativos a los fondos extragalácticos como el Fondo de rayos X (CXB), de rayos gamma (CGB) y hasta del de TeV (CTB).

Se ha mostrado que los blazares son la población de objetos extragalácticos que más contaminan el Fondo Cósmico de Microondas (CMB); ellos añaden un componente no térmica a todo fondo cósmico que a bajas frecuencias afectan el espectro de fluctuaciones del CMB [Giommi et al., 2006]. A más altas energías ($>100\text{MeV}$) la contribución de los blazares sobre predice el fondo extragaláctico, sugiriendo que los blazares no sólo dominan el cielo en rayos gamma sino también su ciclo de actividad promedio a estas frecuencias no es tan alto [Pittori et al., 2007].

Sin embargo, a pesar de que los blazares han sido detectados a energías no sólo $>100\text{MeV}$ sino que a cientos de GeV , la detección de estas fuentes se ve obstaculizada por radiación difusa e isotrópica del fondo extragaláctico (EBL, Extragalactic Background Light). Rayos gamma que se propagan por el espacio intergaláctico son atenuados por las interacciones fotón-fotón con fotones de baja energía que terminan en producción de pares ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$). La morfología de la distribución de energía del EBL es parecida a la de los AGNs (ver figura 1.5) refiriéndose a que ambas tienen dos picos característicos. El SED del EBL (en términos de la longitud de onda) consiste en emisión de radiación desde el infrarrojo lejano hasta rayos UV. El primer pico, desde el óptico hasta el infrarrojo cercano (NIF) es por radiación directa de las estrellas, el segundo pico (en el infrarrojo lejano FIR) se atribuye a la emisión del polvo que absorbe y reemite la radiación de estrellas [Inoue et al., 2013]. Para blazares a corrimientos al rojo desde $z=1$, la atenuación por EBL se vuelve significativa arriba de los 10GeV , por lo que observaciones hechas con instrumentos como Fermi-LAT se utilizan para restringir modelos de EBL [Armstrong et al., 2017].

La medición del EBL es obstruida por la presencia de la luz zodiacal y la luz galáctica [Hauser and Dwek, 2001], por lo que es necesario usar modelos complejos para estimar la densidad de fotones del EBL y la absorción de los rayos gamma. Existen varios modelos de EBL categorizados en tres tipos de métodos para determinar la evolución en función del corrimiento al rojo [Inoue et al., 2013]. El primer modelo usa el método de evolución hacia atrás. Empieza por las propiedades de galaxias en el universo local y describe su evolución extrapolando información hacia atrás en el tiempo en una forma parametrizada. Los modelos contenidos en este método son Franceschini et al. [2008], Stecker et al. [2006]. El segundo método es de evolución hacia adelante, la base es una descripción histórica de la formación de las estrellas cósmicas (CSFH, Cosmic Star Formation History), con esto se crean modelos de la distribución espectral (SED) de poblaciones estelares que luego se mezclan para obtener la evolución del EBL. Entre los modelos que usan este método están Kneiske et al. [2004] y Finke and Razzaque [2009]. Finalmente, el 3er método está enraizado en el marco cosmológico moderno de la formación de estructuras a gran escala impulsadas por el modelo cold dark matter, modelos semi analíticos de formación de galaxias tomando en cuenta la historia de formación de la materia oscura así como de la evolución del componente bariónico, incluye efectos del enfriamiento de gas y formación estelar. Entre los modelos en este método están

Primack et al. [2005] y Gilmore et al. [2009].

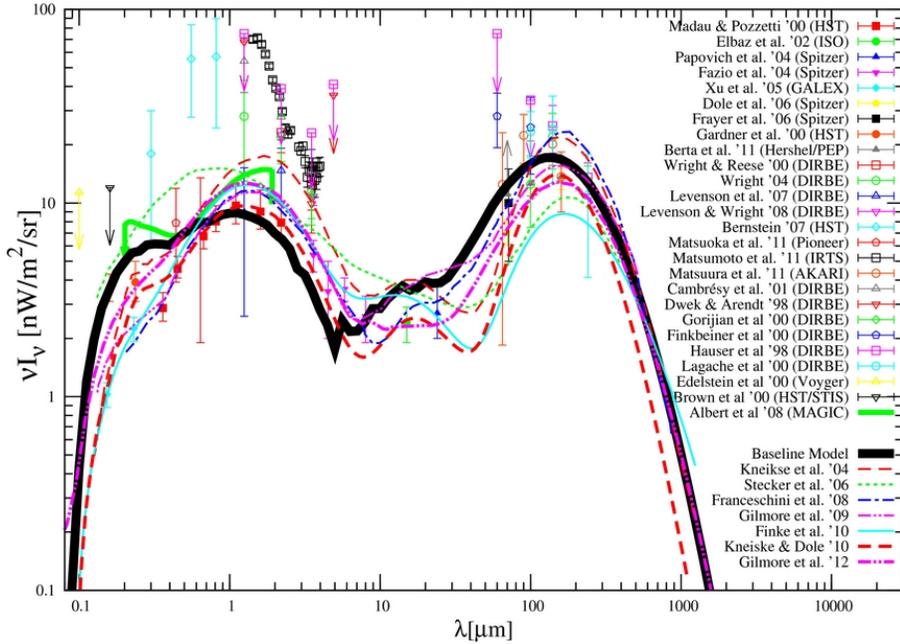


Figura 1.5. El modelo base de EBL se muestra con la línea negra sólida. El modelo Kneiske et al. [2004] es la línea roja no continua, el modelo Stecker et al. [2006] es la línea verde punteada, el modelo Franceschini et al. [2008] es la línea azul no continua y punteada, Gilmore et al. [2009] se muestra como la línea rosada no continua y Finke and Razzaque [2009] es la línea celeste no continua. (ref: [Inoue et al., 2013])

1.4. Blazares

Los Blazares son la clase más extrema de AGNs. El modelo para la explicación de emisión de blazares es que estas fuentes tienen su chorro relativista apuntando directamente al observador o comprendiendo un ángulo muy pequeño a la línea de visión del observador ($\leq 10^\circ$) [Urry and Padovani, 1995]. El término blazar fue dado por el astrónomo Edward Spiegel en 1978 [Blandford, 1996], presuntamente llegó a la palabra por la contracción de las clases BL Lac y cuásar pero al momento no se tenía una definición precisa de blazar.

Se sabe ahora que las propiedades que definen a los blazares son la rápida e irregular variabilidad, la alta polarización óptica, la morfología radio dominante, el movimiento superlumínico (ver sección 1.5.4), y un espectro continuo que se extiende desde longitudes de onda de radio hasta rayos gamma [Padovani et al., 1999].

Su espectro de distribución de energías (SED, Spectral Energy Distribution) es caracterizado por dos picos (ver figura 1.6). El primer pico ocurre en bajas energías: desde el radio (μeV) hasta rayos X (keV), es explicado mediante la emisión de radiación sincrotrón no térmica producida por electrones relativistas en el chorro. Para el segundo pico, a energías mayores (rayos gamma desde GeV a TeV), se tienen dos posibles escenarios: un leptónico el cual propone que los fotones se originan mediante el proceso Compton Inverso originado por electrones relativistas en el chorro o un hadrónico que explica la emisión por medio de cascadas hadrónicas producidas en el chorro.

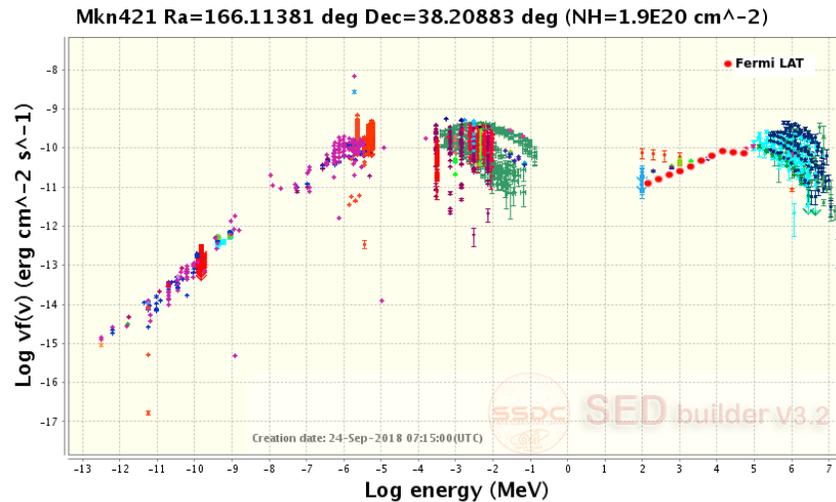


Figura 1.6. Espectro histórico compuesto de múltiples longitudes de onda del blazar BL Lac Markarian 421. Se observan datos de muchas campañas como NED (The NASA/IPAC Extragalactic Database) a energías desde radio hasta keV (puntos violeta), CRTS (Catalina Real-Time Transient Survey) desde el óptico hasta ultra violeta (puntos rojos no circulares), datos de MAGIC y VERITAS a energías de TeV (puntos verdes y azules). Los círculos rojos ubicados en el segundo pico del espectro pertenecen a Fermi LAT. <https://tools.ssdsc.asi.it/>

1.4.1. Tipos de Blazares

Los blazares se dividen en BL Lac y FSRQ, dependiendo de la presencia y anchura de líneas de emisión en su espectro óptico, de la variabilidad y de su polarización.

La diferencia principal entre ambos se encuentra en su espectro óptico; el espectro de los blazares BL Lac no muestran líneas notorias en su espectro o carecen totalmente de ellas. Mientras que en los FSRQ, el espectro tiene líneas anchas, claras

Característica	
Líneas de emisión en el espectro óptico	FSRQs exhiben más líneas.
Variabilidad de flujo óptico	BL Lacs son más variables.
Variabilidad en la polarización óptica	BL Lacs presentan más variabilidad.
Pico sincrotrón	FSRQs pico a bajas energías.
Corrimiento al rojo	FSRQs tienen corrimientos al rojo mayores.
Luminosidad	FSRQs son generalmente más luminosos.

Tabla 1.1. Diferencias entre blazares FSRQ y BL Lac [Cannon, 2012].

y distinguibles. Un blazar se clasifica como BL Lac si el ancho equivalente (EW)⁴ de la línea más notoria es < 5 , si es lo contrario es un FSRQ [Cannon, 2012]. La razón de esta diferencia es que los FSRQ tienen un ángulo mayor entre el eje del chorro y el observador, por lo que se logra observar regiones de nubes de materia interestelar (gas y polvo) moviéndose a velocidades rápidas ($\sim 1300\text{km s}^{-1}$) [Gaskell, 2009] (BLR, Broad Line Region) lo cual produce líneas anchas, como se mencionó antes por medio del ensanchamiento Doppler. Algunas características que diferencian a ambos tipos de blazares se enlistan en la tabla 1.1.

El tipo FSRQ engloba otros objetos: los OVV, los CDQ y los HPQ. Estos objetos se incluyen en los FSRQ pues aunque sus definiciones empíricas sean distintas, la evidencia indica que se comportan de la misma forma [Urry and Padovani, 1995]. El tipo OVV es un tipo de blazar muy variable, su emisión puede variar hasta en un 50% en un día. En apariencia es muy similar a los BL Lac pero presenta líneas anchas de emisión y tiende a tener un corrimiento al rojo (z) grande. El blazar 3C 279 es un ejemplo de un OVV. Los cuásares de alta polarización (HPQ, High Polarized Quasars), presentan líneas de emisión delgadas y tienen rangos de luminosidades parecidas con los RBL (Radio BL Lac) [Scarpa and Falomo, 1997]. Los blazares presentan una polarización lineal alta lo cual es un indicativo de una emisión sincrotrón originada en una región ópticamente delgada con un campo magnético anisotrópico [Impey and Tapia, 1990]. Los objetos CDQ (Core Dominated Quasars), presentan un espectro plano (flat spectra), vistos desde ángulos pequeños respecto al eje del chorro. El efecto faro relativista (relativistic beaming, ver sección 1.5.3) amplía su flujo y es responsable de la luminosidad del núcleo.

⁴El ancho equivalente (EW, Equivalent Width) es el ancho de una línea de emisión o absorción en una gráfica de intensidad ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) vs. energía

Originalmente, los blazares BL Lac eran clasificados dependiendo si se encontraban en ondas de radio o en rayos X como RBL y XBL. Sin embargo, el desarrollo de los observatorios permitió la detección en óptico y en rayos gamma. En el presente los BL Lac son subdivididos dependiendo de la energía en la cual alcanzan el pico de sincrotrón (ν_{pico}^s)(ver Figura 1.6). Las divisiones son: LSP (low-synchrotron peaked), ISP (intermediate-synchrotron peaked) y HSP (high-synchrotron peaked). Se toman los valores publicados en Abdo et al. [2010a] para calificarlos. Para un LSP, $\nu_{pico}^s \sim 10^1$ eV, para ISP el rango es $10^2 \text{ eV} < \nu_{pico}^s < 10^3$ eV y para HSP $\nu_{pico}^s > 10^3$ eV. Los antiguos RBL son los LSP y los XRL son los actuales HSP, los ISP se encontrarían en un intermedio entre RBL y XBL. Recientemente se detectó una nueva familia de blazares extremos con el pico sincrotrón a energías mayores que los HSP [Sversut Arsioli et al., 2018].

1.5. Características de Blazares

1.5.1. Variabilidad

Los blazares presentan una variabilidad muy alta de flujo a todas longitudes de onda. En particular, la variabilidad en rayos gamma puede ser desde intervalos de minutos hasta meses. Estas rápidas variaciones implican que la región de emisión es pequeña.

Para conocer el tamaño de la región de emisión se usa la ecuación:

$$R \leq \frac{\delta c \Delta t}{1 + z} \quad (1.1)$$

donde R es el radio de la región de emisión, δ es el factor Doppler, Δt es el tiempo de la variabilidad observada, c es la velocidad de la luz en el vacío y z es el corrimiento al rojo de la galaxia [Cannon, 2012]. La ecuación (1.1) muestra que el radio de la región de emisión es proporcional al tiempo de variabilidad. El Δt es el intervalo de tiempo entre los fotones detectados inicialmente, pues fueron los primeros que salieron de la región, y los fotones que se detectan de último ya que estos se emitieron en la partes más interiores de la región.

Para ejemplificar, el blazar 3C 279 estudiado por Hayashida et al. [2015], presenta una variabilidad de ~ 21 horas en un intervalo de tiempo de 5 días. (Figura 1.7)

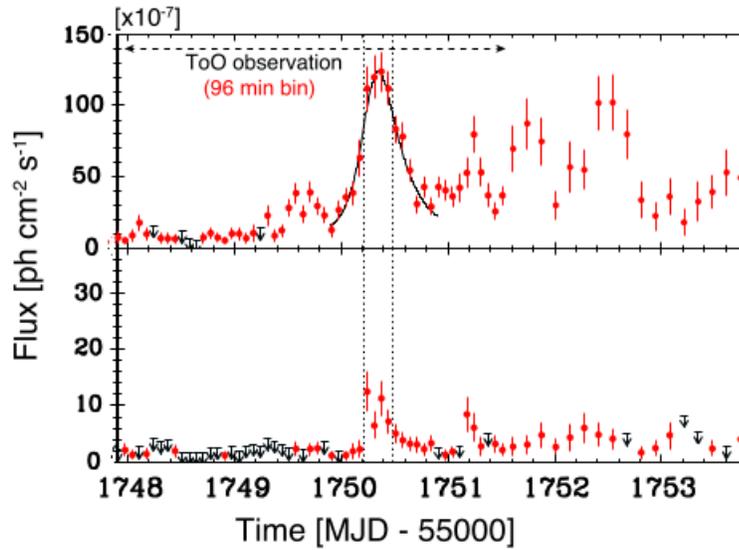


Figura 1.7. Se muestra en el panel de arriba uno de los picos de actividad del blazar 3C 279 a energías $> 100\text{MeV}$ desde el 01 de abril, 2014 hasta el 06 de Abril, 2014 con intervalos de tiempo iguales a una órbita de Fermi LAT (96 minutos). La fase con flujo alto duró ~ 21 horas. En el panel de abajo se muestra la variabilidad detectada a energías $> \text{GeV}$. [Hayashida et al., 2015]

1.5.2. Chorro relativista

Algunos de los procesos más energéticos y potentes del universo se dan en los chorros de los AGNs. Como se ha mencionado, los chorros de los blazares están alineados al eje de observación por lo tanto, el estudio de blazares permite investigar propiedades de los chorros como su origen y constitución.

Su composición es de plasma, sin embargo no se conoce con exactitud las partículas que conforman este plasma. Los candidatos son protones y electrones relativistas o pares electrón-positrón [Hirovani, 2000], y existen propuestas que dicen los chorros se componen de una combinación de ambos. Un estudio en rayos X elaborado por Sikora and Madejski [2000], demostró que usando un modelo con plasma compuesto solamente de pares electrón-positrón se predice una emisión mucho mayor en rayos X de la observada, en cambio usando el modelo con electrones y protones se espera menor emisión en rayos X.

El modelo de dos flujos de plasma propuesto por Sol et al. [1989] plantea que los chorros consisten en un flujo interior de pares electrón-positrón ultra relativistas que se originan del interior del disco de acreción y de un flujo de electrones y protones menos relativistas que lo rodea. Se cree que el segundo flujo viene del disco de

acreción completo.

La masa que compone los chorros estuvo una vez en el disco de acreción. Para que la masa se acrete eficientemente en el agujero negro un porcentaje pequeño del momento angular de la materia debe perderse, es aquí donde el campo magnético influye. En general, la aceleración y la colimación del plasma producen los chorros en los AGNs.

El mecanismo que causa la aceleración en las partículas de los chorros no es conocido pero se plantean dos posibilidades: uno con contribución de campo magnético y el otro sin campo magnético. Para la aceleración con campo magnético hay tres procesos propuestos, (1) la aceleración debida al campo magnético toroidal. Este describe la aceleración inicial de materia por medio del campo magnético que emerge del disco de acreción produciendo una fuerza perpendicular al disco [Uchida and Shibata, 1985]; (2) la aceleración magneto-centrífuga, que requiere una combinación de fuerza centrífuga y un campo magnético fuerte [Blandford and Payne, 1982] y (3) la aceleración magneto-centrífuga de la magnetósfera del agujero negro que involucra conversión de energía electromagnética a energía cinética [Sol et al., 1989].

Entre los procesos para la aceleración de partículas sin contribución del campo magnético están: (1) la aceleración radiativa: esta consiste en que presión radiativa se produce vía aniquilación electrón-positrón dentro del plasma la cual acelera la materia del chorro [Guthmann et al., 2002] y (2) la aceleración térmica, este modelo requiere una corona caliente al rededor del disco de acreción y funciona bien al combinarlo con el modelo de aceleración magneto-centrífuga de la magnetósfera del agujero negro.

La colimación del chorro, al igual que los procesos de aceleración no se puede explicar con certeza. Algunos mecanismos propuestos son: (1) colimación por gradiente de presión. Ocurre cuando la presión del material exterior tiene una presión mayor, creando un gradiente que colima al material interior y (2) la colimación por el campo magnético toroidal. Aquí se crean corrientes eléctricas que confinan el material del chorro [Cannon, 2012].

1.5.3. Efecto Faro Relativista

Los chorros relativistas de los blazares, compuestos de plasma, se encargan de transportar energía continuamente y expulsarla a sus exteriores.

En el chorro se encuentran áreas de material más denso llamadas *nodos*, los cuales contienen no sólo partículas pero también fotones. Los nodos se mueven a lo largo del chorro con un factor de Lorentz (Γ) que depende de la velocidad de grupo del nodo. El factor de Lorentz se define como:

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1.2)$$

donde $\beta = v/c$, v es la velocidad con la que se mueve el nodo a través del chorro. Los factores de Lorentz de los chorros de los blazares van aproximadamente desde $\Gamma = 5$ hasta $\Gamma = 40$ [Saikia et al., 2016].

Debido a que los nodos se mueven a velocidades relativistas, ocurre el efecto faro relativista que afecta la apariencia de los chorros en su totalidad. La luminosidad aparente del chorro aumenta (cuando el chorro apunta a un ángulo pequeño del observador) y además se produce la colimación del chorro formando un cono con un ángulo de $\theta = 1/\Gamma$

La luminosidad observada debido al efecto faro relativista se describe como:

$$L_{obs} = \delta^{2+\alpha} L_{chorro} \quad (1.3)$$

donde L_{obs} es la luminosidad que se observa en el marco de referencia del observador, δ es el factor de faro (beaming), α es el índice espectral de la fuente y L_{chorro} es la luminosidad en el marco de referencia del chorro.

El factor de faro se define como:

$$\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)} \quad (1.4)$$

el cual depende de el ángulo entre el observador y el chorro (θ). Entre más grande sea θ , menor será δ [Kellermann and Owen].

1.5.4. Movimiento Superlumínico

Anteriormente se dijo que dado a que la materia en el chorro de los blazares se mueve en un marco relativista, varios fenómenos ocurren en este, como el movimiento superlumínico. Este es el nombre que se le da cuando la velocidad aparente de un objeto es mayor a la velocidad de la luz ($v > c$), por lo que un observador en la Tierra observará que la materia en el chorro tiene una velocidad aparente más grande de la velocidad de la luz en el vacío.

La figura 1.8 describe una fuente moviéndose en la dirección AB hacia el observador O con velocidad v y ángulo θ . En el tiempo t_1 sale un fotón desde el punto A y en el tiempo t_2 otro fotón sale del punto B. Estos fotones llegan en el tiempo t'_1 y t'_2 , respectivamente. El ángulo ϕ es muy pequeño por lo que los fotones recorren la misma distancia D_L hacia O.

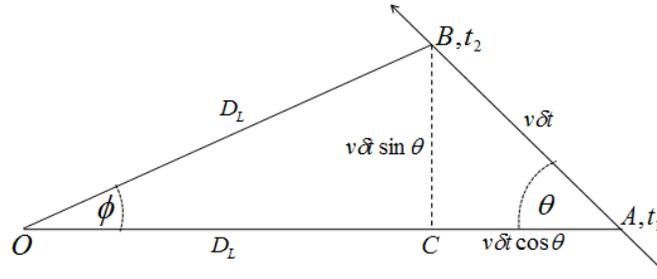


Figura 1.8. Esquema para demostrar el movimiento superlumínico. (Ref: en.wikipedia.org/wiki/Superluminal_motion)

Entonces, tomando $t'_1 = t_1 + \frac{D_L}{c} + \frac{v\delta t \cos\theta}{c}$ y $t'_2 = t_2 + \frac{D_L}{c}$ donde $\delta t = t_2 - t_1$ y $\delta t' = t'_2 - t'_1$ se tiene:

$$\delta t = \frac{\delta t'}{1 - \beta \cos\theta} \quad (1.5)$$

Y para ángulos pequeños tomando $D_L \text{sen}\phi \approx D_L \phi = v\delta t \text{sen}\theta$, se tiene la expresión para la velocidad BC, la velocidad transversal: $v_T = \frac{v \text{sen}\theta}{1 - \beta \cos\theta}$. Y expresándolo en términos de $\beta_T = v_T/c$:

$$\beta_T = \frac{\beta \text{sen}\theta}{1 - \beta \cos\theta} \quad (1.6)$$

β_T será máxima cuando $\theta = \cos^{-1}(\beta)$, por lo tanto, $\beta_T^{\text{max}} = \beta\Gamma$. La única velocidad que podemos medir (v_T) tendrá movimiento superlumínico siempre que $\beta > 0.7$ [Cannon, 2012].

1.6. Modelos de producción de rayos gamma en Blazares

El SED de los blazares se caracteriza por dos picos como se muestra en la figura 1.6, estos picos son de naturaleza no térmica. El primero se encuentra en el rango de energías desde radio hasta rayos X y el segundo en energías desde los rayos X hasta rayos gamma de TeV. El primer pico, de ahora en adelante, se nombrará pico sincrotrón pues la radiación se produce por emisión sincrotrón de una población de electrones o positrones dentro del chorro. Para el segundo pico a mayores energías, en cambio, no se conoce la naturaleza de su emisión, pero se tienen dos modelos que pretenden explicarla: el modelo leptónico, el usualmente aceptado o el modelo hadrónico.

1.6.1. Modelo leptónico

En este modelo se asume que la producción de radiación es dominada por leptones (electrones en su mayoría y posiblemente positrones). No se descarta la presencia de otras partículas, como los protones, pero estas no son aceleradas a una energía suficiente para contribuir de forma significativa a la emisión de radiación.

El primer pico de la distribución espectral de blazares es por el efecto sincrotrón. La radiación sincrotrón es resultado de la interacción partícula-campo magnético. Esta radiación se produce cuando una partícula con carga y velocidad relativista interactúa con un campo magnético \vec{B} , teniendo como resultado una trayectoria helicoidal, gobernada por la fuerza magnética $\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B})$. La desaceleración, es decir, la pérdida de energía cinética de la partícula hace emitir fotones sincrotrón desde longitudes de onda de radio hasta rayos X (ver figura 1.9).

Los fotones sincrotrón creados son los que forman el espectro continuo que se extiende desde radio hasta el óptico (para blazares LSP) y hasta rayos X para fuentes HSP.

El segundo pico se forma por la mezcla entre un componente de emisión sincrotrón y otro de Emisión Compton Autoinducida (SSC por sus siglas en inglés Synchrotron Self Compton) (ver figura 1.10). En la componente SSC los fotones que interactúan con una partícula libre en la difracción Compton inversa son los fotones

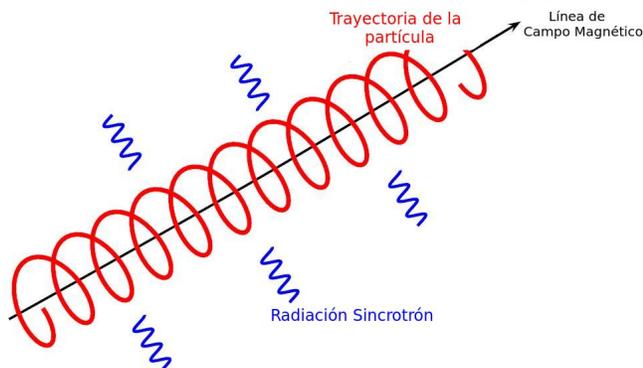


Figura 1.9. Ilustración de la emisión de radiación vía efecto sincrotrón. (ref: http://spiff.rit.edu/classes/ast613/lectures/radio_i/radio_i.html)

que se producen mediante el proceso sincrotrón. Los fotones sincrotrón interactúan con las partículas relativistas que componen el chorro y se difractan en forma de Compton inverso a fotones de mayor energía [Ginzburg and Syrovatsk, 1969] (ver figura 1.10). El modelo de una zona sincrotrón/SSC (one-zone synchrotron/SSC model) propone que la emisión sincrotrón y la emisión SSC se dan en la misma región o en el mismo medio. El modelo de una zona se ajusta exitosamente en la distribución espectral de los HSP BL Lac. Este modelo implica un factor de faro de $\delta \sim 10 - 50$, campos magnéticos de $B \sim 0.01 - 0 - 1\text{G}$, luminosidades $\sim 10^{44}\text{erg s}^{-1}$ [Dermer and Lott, 2012].

Sin embargo este modelo tiene dificultades para explicar las distribuciones espectrales de los FSRQ y de los ISP, quienes requieren tener chorros a una potencia mucho mayor. Por lo tanto es necesario añadir fuentes externas de fotones como del disco de acreción, del toroide o de la región de líneas anchas (BLR) para tener una componente adicional de emisión de rayos gamma. Otro modelo propuesto para explicar la radiación en rayos gamma es el de Compton Externo (EC por sus siglas en inglés External Compton). Los fotones semilla de la difracción Compton inverso son fotones externos al chorro. En este modelo se predice que el campo magnético sea más bajo que en SSC para que la densidad de energía de los fotones externos sea mayor que los fotones sincrotrón [Ghisellini and Madau, 1996].

1.6.2. Modelo hadrónico

En modelos hadrónicos, la población se compone en su mayoría por protones. La emisión de fotones de alta energía es por medio de emisión sincrotrón por protones o por partículas secundarias producidas en interacciones protón-protón (pp) o protón-

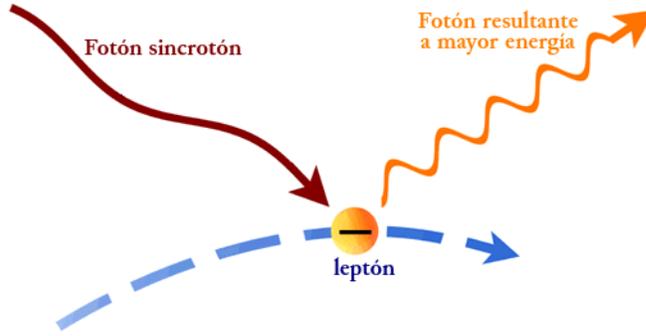


Figura 1.10. Ilustración de la Emisión Compton Autoinducida por medio del efecto Compton Inverso. Ilustración por CXC/S. Lee (http://chandra.harvard.edu/xray_astro/xrays.html)

fotón ($p\gamma$). La condición para que se produzcan fotones rayos gamma $> \text{TeV}$, es que los protones deben tener una energía $> 10^{13} \text{eV}$ para que exista una producción de piones (π). [Böttcher et al., 2013]

Para la emisión sincrotrón vía protones, se necesita un campo magnético más fuerte que en el modelo leptónico (de 30 a 100 Gauss) para lograr acelerar a los protones, quienes tienen una masa 1836 veces mayor a la del electrón.

La emisión por interacción pp y $p\gamma$ da como resultado un decaimiento π , una cascada de partículas π o combinación de ambas:

$$p + p \rightarrow \pi^0 + N \quad (1.7)$$

$$p + p \rightarrow \pi^\pm + N \quad (1.8)$$

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0 + N \quad (1.9)$$

$$p + \gamma \rightarrow n + \pi^\pm + N \quad (1.10)$$

donde N son otras partículas resultado del decaimiento o de la cascada. Si el protón original tiene suficiente energía, el pión (π^0) podría decaer en dos fotones de alta energía, $\gamma_{hard} > \gamma$:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma_{hard} \quad (1.11)$$

Los piones cargados (π^\pm) podrían decaer en cascadas:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (1.12)$$

donde μ^\pm y ν_μ son muones y neutrinos muónicos, respectivamente. Los μ^\pm decaerán posteriormente para producir neutrinos, electrones y positrones por producción de pares, y rayos gamma por radiación bremsstrahlung [Cannon, 2012]:

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \nu_\mu \quad (1.13)$$

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma_{hard} \quad (1.14)$$

1.7. Nucleos Galácticos Activos y Neutrinos

Los AGNs son las fuentes más poderosas observadas en rayos gamma en el universo. Han sido de gran interés como candidatos de aceleradores de rayos cósmicos de alta energía y de ultra alta energía.

Si estos rayos gamma se originan del decaimiento de π^0 , entonces los AGNs también son fuentes de neutrinos de altas energías, lo cual se ha discutido desde la década de 1970 [Eichler, 1979].

Los neutrinos son partículas estables, de carga neutra, y con una masa muy pequeña, los neutrinos de altas energías pueden propagarse sin perturbaciones ni interacciones, manteniendo su dirección y energía intactos desde donde se produjeron hasta ser detectados en la Tierra. Por esta razón, los neutrinos extragalácticos son excelentes partículas mensajeras convirtiéndose en otra forma de estudio de objetos astronómicos. [Aartsen et al., 2016].

Dadas sus emisiones en rayos gamma de altas energías, los tipos de AGNs, cuasáres y blazares son fuentes candidatas para ser los progenitores de neutrinos extragalácticos de energías $>100\text{TeV}$. Observaciones han detectado que la densidad de flujo ($\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) medida de neutrinos de alta energía y rayos gamma de alta energía son comparables, pues ambos decaen de una partícula "madre" ($p+p$ o $p+\gamma$).

Neutrinos de muy alta energía, de más de 10^6MeV han sido detectados por el observatorio de neutrinos IceCube en el Polo Sur. A su vez, rayos gamma de la más alta energía $\sim 10^9$ veces mayor que la energía de un fotón en óptico, han sido observados por observatorios como VERITAS, MAGIC o el Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi. Combinando la información de múltiples mensajeros -

radiación electromagnética y detección de neutrinos-, se puede llegar a conclusiones más precisas de la naturaleza de la fuente y a hipotetizar qué población de partículas se producen en el chorro.

En efecto, IceCube Collaboration et al. [2018] hace un estudio entre el telescopio de rayos gamma Fermi LAT y el detector de neutrinos IceCube. El 22 de septiembre de 2017 IceCube detecta un evento de neutrino en coincidencia espacial y temporal con un pico de actividad en rayos gamma del blazar TXS 0506+056. Esto sugiere que los blazares son la primera fuente identificada de emisión de neutrinos astrofísicos de alta energía (\sim TeV).

2. Instrumentos de observación y catálogo

2.1. Fermi-LAT

El telescopio espacial de Rayos Gamma Fermi (ver figura 2.1), nombrado en honor al físico italiano pionero de la física de altas energías: Enrico Fermi (1901-1954), fue lanzado por la NASA el 11 de junio del 2008 en un vehículo de lanzamiento Delta II. Se compone de dos instrumentos: Gamma-ray Burst Monitor (GBM) y Large Area Telescope (LAT), siendo este último el instrumento principal.

El LAT conocido antes como el Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST), está diseñado para el estudio del Universo en energías desde 20 MeV hasta 300 GeV [Atwood et al., 2009]. Entre sus principales objetivos científicos están: resolver el cielo en rayos gamma y determinar el origen de la emisión difusa y la detección de objetos aún no identificados; entender el mecanismo de aceleración de partículas en objetos astronómicos; estudiar el comportamiento en rayos gamma de GRBs (Destellos de Rayos Gamma) y de objetos transitorios; estudiar la naturaleza de la materia oscura y usar rayos gamma de alta energía para probar características del universo temprano.

El instrumento LAT es un telescopio conversor de pares. Se ubica en una órbita cercana a la Tierra a 550 km de altitud, recorre una órbita completa en 96 minutos, con un campo de visión del 20 % del cielo, por lo que en aproximadamente 3 horas ha escaneado el cielo completo. Tiene una resolución angular muy buena para localizar fuentes, colaborar en estudios de multi-longitudes de onda y su alta sensibilidad a través de un gran campo de visión permite monitorear variabilidad y detectar objetos transitorios.

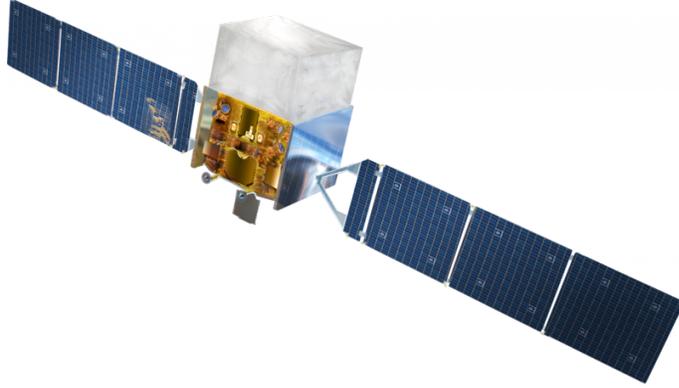


Figura 2.1. Esquema de el telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi. ref: science.nasa.gov

2.1.1. Hardware LAT

El instrumento LAT consiste en un conversor y rastreador de trayectorias, un calorímetro, un detector de anticoincidencia (ACD), un detonante programable y un sistema de adquisición de datos (DAS) (Figura 2.2).

LAT con dimensiones de $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 0.72 \text{ m}$, con una masa de 2789 kg y con la potencia requerida para operar de 650 W, está compuesto por 16 torres en un arreglo de 4×4 con dimensiones de $37 \times 66 \text{ cm}^2$ separadas y sujetadas por una estructura cuadrícula de aluminio de poca masa. Cada torre en su parte superior tiene una lámina de tungsteno, en su interior contiene tiras de silicón, un calorímetro y un módulo de adquisición de datos. El arreglo está rodeado por una barrera plástica que funciona como material discriminador de anticoincidencia y es el primer filtro para partículas cargadas. Por último, el sistema está envuelto por una "manta" que provee aislamiento térmico y protección de escombros [Atwood et al., 2009].

2.1.1.1. Descripción técnica:

Dado a que los rayos gamma no pueden ser reflejados ni refractados como la luz óptica, la forma para detectarlos es por medio de creación de pares. LAT funciona de la siguiente manera: los rayos gamma entran libremente por el detector anti-coincidente, mientras que los rayos cósmicos interactúan con el detector, generando una chispa de luz, filtrando así los rayos gamma y los rayos cósmicos. Los rayos gamma continúan hasta que interactúan con algún átomo de las láminas delgadas de tungsteno, produciendo dos partículas cargadas: un electrón (e^-) y un positrón

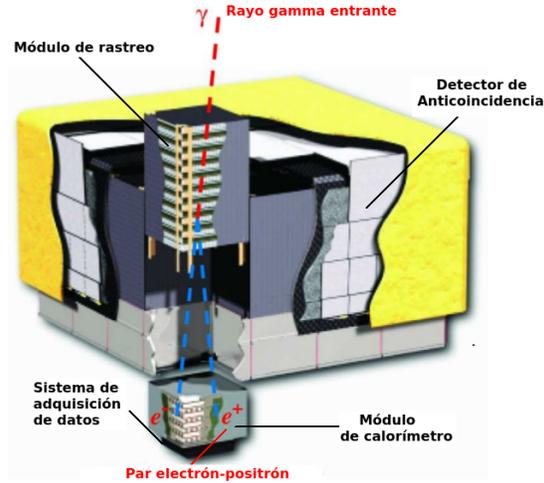


Figura 2.2. Diagrama de Fermi LAT [Atwood et al., 2009].

(e^+). Estas partículas siguen su camino creando iones en los detectores de silicón. Las tiras de silicón se alternan en direcciones de X y Y, permitiendo rastrear la trayectoria de las partículas. Finalmente, las partículas paran al llegar a un calorímetro de yoduro de cesio el cual mide la energía total depositada (Figura 2.3).

Los detalles del funcionamiento y las partes que conforman al LAT se detallarán a continuación:

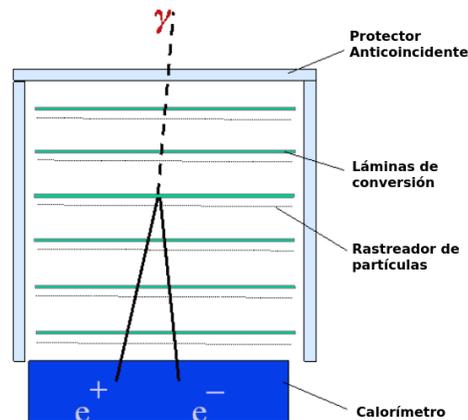


Figura 2.3. Ilustración del diseño de LAT. El sistema anticoincidente, el rastreador de trayectorias y calorímetro. ([http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/CiceroneIntroduction/LAT overview.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/CiceroneIntroduction/LAT%20overview.html)) [Atwood et al., 2009].

Detector Anticoincidente:

El objetivo principal del Detector Anticoincidente (ACD, AntiCoincidence Detector) es el rechazo del fondo de rayos cósmicos. Los rayos gamma atraviesan libremente mientras las partículas cargadas se descartan al causar una chispa de luz por la interacción entre los núcleos pesados y altamente ionizantes en los rayos cósmicos con los átomos del ACD.

El LAT requiere una eficiencia de rechazo para partículas cargadas de al menos 0.997 [Atwood et al., 2009]. Para medir rayos gamma de una energía de 300 GeV, se requiere un gran calorímetro de 1800 kg de masa y profundidad suficiente para obtener una mejor resolución de la energía de la cascada electromagnética causada por los pares de partículas creados en el rastreador al interactuar con el calorímetro. El tamaño grande del calorímetro sugiere que el ACD sea igualmente grande y por lo tanto que el efecto de *Backsplash* (en español "Salpicadura") se incremente. El efecto Backsplash ocurre cuando las partículas secundarias -fotones en su mayoría- de la cascada electromagnética crean una señal falsa en el instrumento. La mayor parte de estas partículas viajan en la misma dirección de la partícula primaria pero una pequeña parte se mueve en sentido contrario e interactúa con el ACD o el tracker y produce electrones por efecto Compton, los cuales llegan al calorímetro produciendo señales falsas.

Este efecto Backsplash fue observado antes en EGRET (Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope) [Kanbach et al., 1989], disminuyendo la eficacia a energías mayores a 10 GeV. Para arreglar esta situación se estableció un requisito en el diseño para mantener estas señales a menos del 20% que consiste en segmentar el ACD en 89 centelladores de plástico, con un arreglo de 5×5 en la parte superior y 16 láminas a los lados, de tal forma que sólo el segmento cercano al candidato de fotón incidente sea considerado, así se reduce drásticamente el área del ACD que contribuye al backslash [Moiseev et al., 2004].

Rastreador de trayectorias.

El rastreador de trayectorias o tracker (en inglés) es el detector primario del LAT, responsable de reconstruir las trayectorias de los pares e^-e^+ creados por los rayos gamma incidentes. Es un arreglo de módulos de 4×4 . Cada uno de los

16 módulos tiene 18 planos rastreadores, sensibles a la posición de partículas; los primeros 16 planos son intercalados con delgadas láminas convertoras de tungsteno [Atwood et al., 2007]. El proceso que toma lugar en el rastreador es el siguiente: luego que el rayo gamma pase del ACD, se dirige hacia el rastreador; una vez ahí, este interactúa con un átomo de las láminas de tungsteno produciendo un par e^-e^+ . Las partículas creadas prosiguen por el rastreador creando iones. Los componentes principales de los módulos del rastreador son los detectores de silicio de una sola cara (SSDs, Single Side Detectors). Los SSDs tienen dimensiones de $8.95 \times 8.95 \text{ cm}^2$ con $400\mu\text{m}$ de ancho con una franja de inactividad de 1mm de ancho. Los pares e^-e^+ que pasan por esta franja inactiva no son detectados. A energías de 100 MeV, estas señales no detectadas deterioran la resolución en la Función de dispersión puntual (PSF, Point Spread Function)¹. Para reducir la pérdida de resolución en la PSF, se requiere medir los pares e^-e^+ tan pronto como se crean y para minimizar los efectos de las regiones inactivas, las láminas de tungsteno sólo cubren las regiones activas de los SSDs (Figura 2.4).

Una de las responsabilidades del rastreador es tener una PSF pequeña a energías menores y un área efectiva grande a energías altas. Para esto, el rastreador está dividido en dos regiones: la región de "frente" que consiste en los primeros 12 planos rastreadores y la región de "atrás" que es los otros 4 planos. La región del frente utiliza las delgadas láminas de tungsteno, de una longitud de $0.03X_0$ donde X_0 es una longitud de radiación², para reducir el PSF a energías bajas, y la región de atrás tiene planos rastreadores mucho más anchos a una $0.18X_0$ para agrandar el área efectiva para detecciones a altas energías.

Tal como en el ACD que existen señales falsas provocadas por la cascada de partículas provenientes del calorímetro, el rastreador también enfrenta problemas debido a estas partículas. Para discriminarlas se mide el *Time-Over-Threshold* (TOT) de cada capa, esta medición se encarga de no tomar la información de un evento, cuando no se cumple la cantidad de carga depositada esperada en la capa. La carga depositada debido a estas partículas es muy grande, de esta manera se puede diferenciar entre un evento de rayos-gamma y un evento de la cascada del calorímetro.

¹PSF: La distribución de probabilidad de la imagen de una fuente puntual en una observación.

²Longitud de radiación (Radiation Length X_0): es una característica de los materiales, se relaciona con la pérdida de energía en interacciones electromagnéticas de partículas de altas energías con el material. Entre mayor la longitud de radiación, mayor el ancho del material.

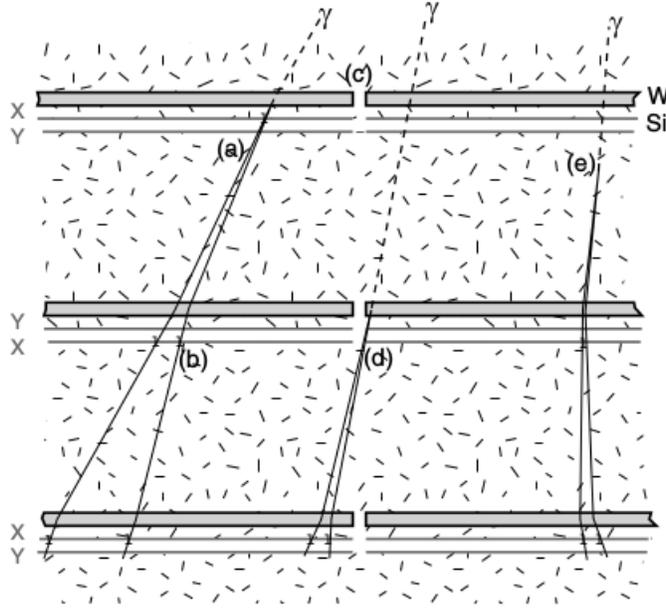


Figura 2.4. Diagrama del rastreador de trayectorias de los pares e^-e^+ creados. La lámina gris es la lámina convertora de tungsteno, las líneas continuas son los detectores de silicio. En el punto (a) pasa una conversión ideal y en (b) el rastreador detecta dos partículas. En el punto (c) se demuestra cómo las láminas de tungsteno sólo cubren las áreas activas de los SSDs; en este punto es donde el PSF pierde resolución. En el punto (d) pasa una conversión que no se detecta sino hasta la segunda capa. En el punto (e) se producen múltiples difracciones en el material estructural o de silicio, causando trayectorias retorcidas por lo que este material se reduce al mínimo [Atwood et al., 2009].

Calorímetro.

Los objetivos primordiales del calorímetro son medir la energía depositada por la cascada de partículas resultante del par e^+e^- , y obtener una imagen del desarrollo de la cascada electromagnética para discriminar el fondo y estimar las fluctuaciones de energía en las cascadas.

El calorímetro tiene 16 módulos compuestos de 96 cristales CsI(Ti) (talio activado de yoduro de cesio), cada cristal con dimensiones de $2.7 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm} \times 32.6 \text{ cm}$ [Grove and Johnson, 2010]. Los cristales están ordenados horizontalmente en 8 capas de 12 cristales cada una. La profundidad vertical total del calorímetro es de $8.6X_0$. Las dimensiones de los cristales CsI son comparables a la longitud de radiación del CsI (1.86 cm) y al radio de Molière³ (3.8 cm) para cascadas electromagnéticas

³Constante de un material que da la escala de la dimensión de una cascada electromagnética

[Atwood et al., 2009].

Cada cristal da 3 coordenadas espaciales para saber la ubicación donde la energía está siendo depositada: las primeras dos son las coordenadas de ubicación del cristal, y la tercera, la más precisa, es determinada al medir la diferencia de energía en la parte baja de los cristales.

Estas características son suficientes para permitir imágenes espaciales de la cascada electromagnética y la reconstrucción precisa de su dirección.

Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

El Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) es el responsable de guardar los datos del ACD, del rastreador y del calorímetro; de implementar activadores de eventos; de proveer procesamiento a bordo de datos con rechazo de fondo para reducir el número de eventos que serán enviados a la Tierra.

El DAQ está estructurado de forma jerárquica con una arquitectura de cuatro niveles. En el nivel más bajo cada módulo rastreador, conversor y módulo de calorímetro están enlazados a un módulo electrónico de torre (TEM, por sus siglas en inglés). Los activadores del TEM son directamente dependientes de los activadores del rastreador y del calorímetro. TEM proporciona almacenamiento de eventos para una posterior lectura de ellos y es la interfaz del Módulo Constructor de Eventos (EBM). El EBM combina la lectura de eventos del TEM y del módulo electrónico del ACD (AEM) y crea eventos completos los cuales son transferidos al EPU (Unidad de Procesador de Eventos). El AEM es el equivalente al TEM para el ACD. Ambos, el EBM y el AEM son componentes del instrumento principal (GASU), el cual está controlado por un software activador a bordo. Adicionalmente al EBM y AEM, GASU comprende el módulo de activador global (Global-Trigger Electronic Module, GEM) y el Comando de Unidad de Resupuesta (CRU). El GEM produce señales basadas en el TEM y el activador ACD, mientras el CRU es responsable de la señal de DAQ y también envía y recibe comandos. Hay dos EPU a bordo para el procesamiento de datos. Esta forma de procesar datos involucra algoritmos de filtro

iniciada por un electrón o fotón de alta energía. Se define como el radio del cilindro que contiene el 90% de la energía de la cascada. Se relaciona con X_0 como: $R_m = 0.0265X_0(Z + 1.2)$, donde Z es el número atómico.

para reducir la frecuencia de datos de 2-4kHz a ≈ 400 Hz [Atwood et al., 2009] y para enviar los datos a la Tierra. La arquitectura de más alto nivel en el DAQ es la unidad de interferencia de la nave espacial (SIU) la cual controla el instrumento LAT. Un componente final para esta descripción es la unidad de distribución de potencia (PDU) la cual suministra corriente DC al GASU, al EPU y a monitores de temperatura y voltaje del instrumento (Ver figura 2.5).

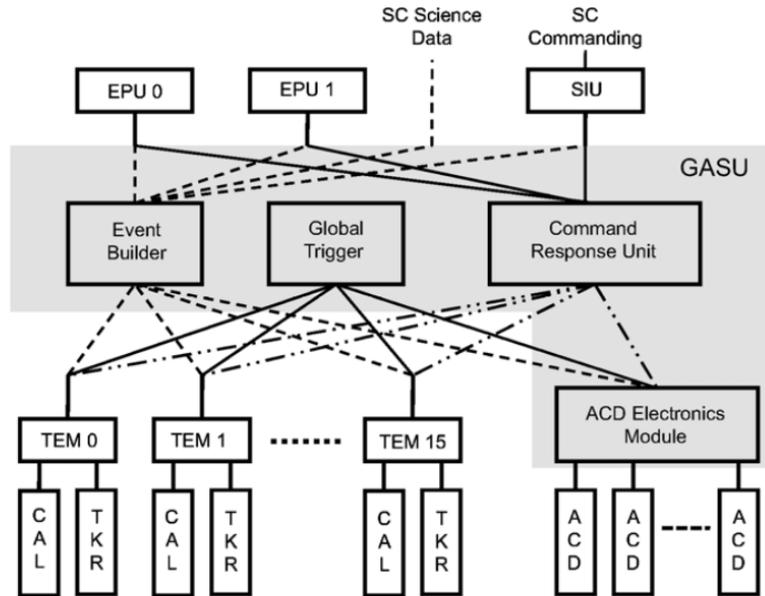


Figura 2.5. El esquema jerárquico del Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) de LAT [Atwood et al., 2009].

Activador programable

El activador (trigger en inglés) de un instrumento es el proceso que decide cuál es el momento correcto para guardar los datos obtenidos. El activador del LAT empieza en los módulos de rastreador y calorímetro. Un módulo rastreador genera una petición para activación si un canal o plano excede cierto umbral. La petición de activación se manda al TEM asociado a ese módulo en particular. Si el activador se verifica en el TEM, la petición de activación se transmite al GEM. Un mensaje de aceptación (Trigger Accept Message, TAM) se envía por medio del GEM al AEM y para cada TEM si estos cumplen los estándares de activación. Luego, cada TEM transmite una señal de activación (TACK) al rastreador y al calorímetro y el AEM envía la señal al ACD. Esto inicia una completa lectura del rastreador, calorímetro

y ACD: se da la ubicación de la detección de eventos en las capas del rastreador así como el TOT para cada capa del rastreador; información del calorímetro; estadísticas del ACD; etc. El último paso del proceso es el envío de la información del activador desde el GEM al EBM donde eventos completos del LAT son construidos.[Cannon, 2012]

2.1.2. Software LAT: Fermi Science Tools

El análisis de los datos de Fermi LAT empieza a través de procesos automatizados en el Fermi ISOC (Instrument Science Operations Center) el cual se encarga de la reconstrucción y clasificación de eventos y del rechazo de fondo. El equipo de Fermi LAT Fermi Science Support Center (FSSC) desarrolló el software *Science Tools* (el software oficial de Fermi LAT) para trabajar en el análisis de rayos-gamma y en la reconstrucción de eventos.

Las Fermi Science Tools pueden ser utilizadas si se corren bajo el ambiente FTOOLS, esta herramienta que pertenece a HEASoft ⁴, es de uso general para misiones astronómicas. Este paquete de herramientas permite trabajar con archivos .FITS ⁵, abrir o graficar ciertas columnas de datos, mezclar archivos .FITS que han sido descompuestos previamente y correr las FermiTools usando líneas de comandos. A continuación se da una descripción más detallada del manejo de datos.

2.1.2.1. Centro de Operación Científica del Instrumento (ISCO)

Los datos de eventos del LAT son enviados al ISCO en grupos de 1.5 GB de memoria cada 3 horas, es decir, cada dos orbitas de LAT, en donde un proceso automatizado combina información de un evento del ACD, del rastreador y del calorímetro.

Un evento es clasificado como proveniente de una fuente de rayos-gamma o como fondo de rayos-gamma con el cálculo de la dirección de llegada, y su energía y trayectoria reconstruida. El tiempo de llegada es guardado, ya que es necesario para los estudios temporales.

⁴<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/lheasoft/>

⁵Flexible Image Transport System (FITS) es el formato de archivo digital más comunmente usado en astronomía. Se usa para guardar, transmitir y procesar datos, viene en un arreglo de N dimensiones o en tablas.

Los objetivos principales del proceso automatizado son: la reconstrucción de eventos que incluye la determinación de la trayectoria la cual es fundamental para determinar la ubicación original del rayo-gamma y la estimación de la energía de los eventos; el rechazo de fondo y la clasificación de eventos. Para distinguir entre un evento de fondo y otro de una fuente se hacen simulaciones del calorímetro; dependiendo de la calidad de la trayectoria reconstruida y de qué tan bien se ajusta la medición de energía del calorímetro.

2.1.2.2. Proceso científico automatizado (ASP)

Ya que los datos están reconstruidos y aislados, estos se hacen públicos en el Fermi Science Support Center (FSSC) aproximadamente 3 ó 4 horas después de ser enviados a la Tierra para el análisis al ISCO. El ASP toma lugar semanalmente y es un conjunto de análisis automatizados que detectan fuentes que varían rápidamente en el tiempo, por ejemplo los destellos de rayos gamma (GRBs) o los núcleos galácticos activos. Posteriormente, el grupo Fermi Gamma-ray Sky actualiza información relevante del cielo en rayos-gamma. Estas actualizaciones alertan a observatorios en diferentes longitudes de onda para estudiar objetos de interés.

2.1.2.3. Análisis Agrupado de Máxima Verosimilitud.

La detección, la determinación de flujo y el modelo espectral de las fuentes de Fermi LAT se realizan usando el Análisis Agrupado de Máxima Verosimilitud (Binned Maximum Likelihood Analysis). Este se usa para análisis con muchos eventos, a diferencia del análisis no agrupado (unbinned) que analiza periodos cortos de tiempo (pocos eventos). Para realizar el análisis de máxima verosimilitud en una fuente, se propone un modelo, el cual es la distribución de fuentes de rayos-gamma en el cielo, incluyendo su intensidad y su espectro, ambos basado por resultados de observaciones previas.

La verosimilitud (se nombrará L por Likelihood) es la probabilidad de que el modelo (fuente + fondo) se ajuste a los datos del evento que está siendo analizado. El modelo más realista tendrá la más alta verosimilitud. L se define como:

$$L = \exp(-N_{exp}) \prod_i \frac{m_i^{n_i}}{n_i!} \quad (2.1)$$

donde m_i son las cuentas en cada bin predichas por el modelo, n_i son las cuentas detectadas en cada bin. La probabilidad de detectar n_i cuentas en el i -ésimo bin es

$m_i^{n-i}/n_i!$. Esto depende de los datos y del número total de cuentas que el modelo predice $N_{exp} = exp(-m_i)$ [Cannon, 2012]. El proceso implica variar parámetros del modelo e iterar hasta encontrar la verosimilitud máxima.

Todos los modelos propuestos se está ajustando simultaneamente y para incrementar la eficiencia se emplean optimizadores. El optimizador usado en este análisis es MINUIT el cual determina el mejor ajuste para parámetros espectrales. Cada modelo incluye, las coordenadas de ascensión recta (AR) y declinación (Dec) de la fuente que se está estudiando; las coordenadas de otras fuentes dentro de la región de interés (ROI); un modelo de la región de emisión galáctica difusa (gll_iem_v06.fits) y el modelo correspondiente de las regiones extragalácticas de emisión difusa (isotropic_iem_v02_P6_V11_DIFFUSE.txt).

2.1.2.4. Estadística de prueba (TS)

La Estadística de prueba (TS) es una variable que se usa para probar una hipótesis. TS se define como:

$$TS = -2\ln\left(\frac{L_{max,0}}{L_{max,1}}\right) \quad (2.2)$$

donde $L_{max,0}$ es el valor de máxima verosimilitud para un modelo sin la fuente estudiada (la hipótesis nula) y $L_{max,1}$ es la hipótesis de máxima verosimilitud para un modelo con la fuente en una ubicación específica. EL TS crece en función de $L_{max,1}$, por lo tanto, si crece el parámetro de probabilidad el TS de la fuente crecerá, demostrando así el desacuerdo con la hipótesis nula $L_{max,0}$ [Mattox et al., 1996]. El TS se utiliza para cuantificar qué tan significativamente esta fuente estudiada emerge del fondo.

2.1.2.5. Preparación de datos

Como se mencionó antes, los datos están disponibles para ser descargados en la página web de FSSC ⁶. Hay dos tipos de archivos de datos que provienen del proceso automatizado (ASP): Los archivos de eventos y el archivo de Spacecraft (de la nave espacial). Los archivos de eventos se dividen en dos tipos, el archivo de fotones, que contiene datos de eventos puntuales y viene con toda la información necesaria para

⁶<https://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi>

su análisis (tiempo, energía, posición, etc) y el archivo extendido que se compone de la información de eventos transitorios. El archivo de Spacecraft proporciona detalles de la nave espacial: como a la región a la que apunta en un periodo de tiempo, en intervalos de 30 segundos y describe la posición y orientación del LAT en función del tiempo. Ambos archivos se descargan en formato FITS.

La preparación de los datos depende el tipo de análisis que se realizará (para fuentes puntuales, fuentes extendidas, análisis espectrales de GRBs, etc). Para esta tesis se hace el análisis para fuentes puntuales por lo tanto se usa el archivo de eventos de fotones. Los parámetros para el análisis de las fuentes fueron: la región de interés, $\text{ROI} = 15^\circ$, el ROI deberá ser más grande que el PSF característico para que el modelo tome contribuciones de fuentes cercanas, $t_{\min} = 241920001 \text{ MET}$ ⁷, $t_{\max} = 557452805 \text{ MET}$, $E_{\min} = 100 \text{ MeV}$, $E_{\max} = 300 \text{ GeV}$ y ángulo de cenit 90° .

La preparación de datos se realiza en dos pasos:

- **gtselect:** realiza cortes en el archivos de datos de eventos según su ROI, tiempo, energía y ángulo de cenit elegidos.
- **gtmktime:** se usa para actualizar la extensión GTI (Good Time Intervals), la cual es una lista que contiene los rangos de tiempo en que los datos son validos, es decir, el rango de tiempo en que LAT estaba recolectando datos, a su vez aplica corte de datos cuando la nave espacial pasa por la Anomalía del Atlántico Sur (AAS).

2.1.2.6. Mapas de conteo

Se producen mapas de conteo en 3 dimensiones (coordenadas espaciales + energía) para identificar fuentes candidatas para el modelo de máxima verosimilitud y para asegurar que la región extraída de estudio sea vista claramente. Para generar mapas de conteo se usa la herramienta gtbins la cual, entre otros propósitos, realiza mapas de conteo en 2 dimensiones (coordenadas espaciales) para análisis no agrupados y en 3 dimensiones para análisis agrupados.

⁷Mission Elapsed Time (MET) es el sistema de tiempo que cuenta los segundos transcurridos desde el 1 de enero del 2001 a la 0h:0m:0s en UTC, equivale a 51910 MJD (Modified Julian Date) en UTC.

2.1.2.7. Mapas de exposición

En este paso se identifican fuentes candidatas y se define el modelo de fuentes. Los mapas de exposición son mapas que muestran este modelo en un archivo XML. Este archivo contiene la mejor aproximación de la ubicación y del modelo espectral de las fuentes en los datos. El archivo XML usa, para cada fuente en el modelo, los modelos espectrales del catálogo 3FGL (3rd catalog of the Fermi Gamma-ray LAT)⁸.

Para obtener el archivo XML se calcula primero, con la herramienta *gtltcube*, el *livetime cube* que es el número de cuentas que las fuentes en el cielo producen y que dependen del tiempo de observación y del ángulo entre la fuente y el eje z del instrumento.

Una vez calculado el *livetime cube* se aplica a la región de interés (ROI) para esto se usa la herramienta *gtexpcube2*, la cual genera el mapa de exposición, o un grupo de mapas de exposiciones para diferentes energías.

2.1.2.8. Mapa fuente

El mapa fuente mezcla los componentes del modelo de la fuente: mapa de conteo y mapa de exposición (generado por *gtbin* y *gtexpcube2*, respectivamente) con la función de respuesta del instrumento (IRF). La IRF es una función de energía y ángulo entre el eje z del LAT y todas las fuentes del cielo, su función es mapear el modelo de fuente con las observaciones. La herramienta *gtsrcmaps* realiza la mezcla para cada una de las fuentes en el mapa de exposición.

2.1.2.9. Análisis de Verosimilitud con Gtlike

La herramienta *gtlike* es la encargada de hacer el Análisis Agrupado de Máxima Verosimilitud de los datos de Fermi LAT cuando se cuenta con los archivos necesarios ya mencionados.

La aplicación del método de máxima verosimilitud a los experimentos de conteo de fotones fue descrita por Cash [1979]. Este método se aplicó a los datos del precesor de Fermi LAT, EGRET como un estimador de parámetros [Mattox et al., 1996].

⁸<https://arxiv.org/abs/1501.06054>

Se usa la estadística de máxima verosimilitud para encontrar los mejores parámetros del modelo de entrada, que es, como ya se mencionó, la distribución de fuentes de rayos-gamma en el cielo. Estos parámetros se encuentran usando una optimización de probabilidad de Poisson. Con la distribución de Poisson (ver ec. 2.3) se caracteriza el número observado de cuentas en cada bin.

$$p(n, m) = \frac{m^n e^{-m}}{n!} \quad (2.3)$$

la distribución indica la probabilidad de observar n cuentas en los datos observados, siendo m el valor predicho. La probabilidad de observar estos puntos (n_i) en el modelo se da por la verosimilitud (L) (ver ecuacion 2.1).

2.1.3. Enrico

Enrico es un software externo a la misión de Fermi LAT, diseñado para tener un manejo más práctico de las FermiTools. Para poder utilizar el software de Enrico, es necesario tener instaladas las FermiTools y luego proseguir a instalar Enrico.⁹

Enrico usa un archivo de configuración que contiene todas los parámetros iniciales y herramientas para que el análisis de la Máxima Verosimilitud se realice. El archivo de configuración se divide en varias secciones:

Sección de la fuente:

- Nombre de la fuente
- Las coordenadas espaciales en grados (AR y Dec).
- Modelo espectral de la fuente. Los modelos disponibles son Ley de Potencias, Ley de Potencias 2, LogParabola, PLExpCutoff.
- El corrimiento al rojo (z) de la fuente.
- El modelo de la luz de fondo extragaláctico (EBL, Extragalactic Background Light) que se identifica con números del 0 al 6, siendo: 0 =Kneiske, 1 =Primack05, 2 =Kneiske_HighUV, 3 =Stecker05, 4 =Franceschini, 5 =Finke y 6 =Gilmore.

Sección espacial: donde se definen las propiedades del ROI. El x_{ref} y y_{ref} que son el centro del ROI ($x_{ref} = AR$, $y_{ref} = Dec$) y el tamaño del ROI que para esta tesis

⁹Instrucciones de instalación y descarga: <https://enrico.readthedocs.io/en/latest/>

se utilizó un $\text{rad} = 15^\circ$.

Sección de archivos: se llaman a los archivos .FITS de fotones (PH.FITS) y de la nave espacial (SC.FITS) y se da la ubicación del archivo XML creado.

Sección de tiempo: se enlistan el tiempo inicial, el tiempo final de observación de la fuente y el sistema de tiempo, en este caso 'MET'.

Sección de energía: aquí va la energía mínima y la energía máxima con la que se hará el análisis.

Sección de espectro: se encarga de generar los archivos para el análisis de Máxima Verosimilitud.

- FitsGeneration: si la entrada es sí, enrico hará todos los pasos previos para correr glike, si la entrada es no, enrico sólo correrá el glike.
- ResultsPlots: Hace la gráfica del SED (Spectral Energy Distribution).
- FrozenSpectralIndex: congela un valor específico del índice espectral de la fuente (funciona sólo con los modelos de Ley de Potencias y Ley de Potencias 2).

Sección de Curvas de Luz: aquí se corre el análisis completo en episodios temporales y genera los archivos FITS faltantes para hacer el glike.

- FitsGeneration: si la entrada es sí, se generan todos los archivos necesarios para el glike.
- NLCbin: es el número de episodios temporales que tendrá la curva de luz.
- MakeConfFile: `enrico_lc` producirá un archivo de configuración por cada episodio temporal.
- TSLightCurve: un límite superior se crea si el TS en un episodio temporal es menor que el valor indicado.
- DiagnosticPlots: pregunta a `enrico_plot_lc` si generar una gráfica de diagnóstico (TS vs. tiempo, N_{pred} vs. flujo)

A continuación se enlistan los comandos principales para realizar el análisis:

- `enrico_config` : Se usa este comando para hacer rápidamente el archivo configuración mencionado. La forma de realizarlo es: `enrico_config mianalisis.conf`. Luego se ingresa toda la información necesaria para realizar el análisis.

- `enrico_xml` : este comando se usa para crear el archivo `.xml` del modelo en rayos-gamma del cielo con fuentes del catálogo 3FGL.
- `enrico_sed` : corre `gtlike` después de haber producido todos los archivos `.FITS` necesarios.
- `enrico_lc` : produce la curva de luz al correr `gtlike` en diferentes episodios de tiempo.
- `enrico_plot_sed` : grafica el SED (Spectrum Energy Desity) resultante de `enrico_sed`.
- `enrico_plot_lc` : grafica la curva de luz resultante de `enrico_lc`.

2.2. IceCube

En las seis décadas después del descubrimiento de Frederick Reines y Clyde Cowan [Reines et al., 1960], y nueve décadas después de su definición de una nueva partícula leptónica eléctricamente neutra llamada neutrino hecha por Ernst Pauli en 1930, se desarrollaron detectores para explorar las propiedades y las fuentes de estas. Entre las primeras detecciones están los neutrinos a energías de MeV a consecuencia de la fusión nuclear en el Sol [Cleveland et al., 1998] y los neutrinos atmosféricos a un rango de energía de GeV a TeV [Aartsen et al., 2017] resultantes de interacciones entre rayos cósmicos y partículas atmosféricas.

Los rayos cósmicos que interactúan en la Tierra se cree que provienen de objetos astrofísicos de muy alta energía como remanentes de supernovas, destellos de rayos gamma (GRBs) y núcleos galácticos activos (AGNs). Estos objetos pueden producir neutrinos a escalas de energía de PeV por medio de cascadas hadrónicas (ver capítulo 1). Gracias a que los neutrinos tienen una débil interacción con la materia y son eléctricamente neutros se puede determinar la dirección de donde se originaron. Por tal razón, en los últimos años se han desarrollado detectores para tales objetivos como AMANDA, ANTARES y IceCube.

El observatorio de neutrinos IceCube está ubicado en la Antártica (hemisferio sur) en la estación Amundsen-Scott. El detector está enterrado a 2500 metros de la superficie y tiene un volumen de 1 kilómetro cúbico, convirtiéndolo en el detector de neutrinos más grande del planeta [Aartsen et al., 2017].

El 18 de diciembre de 2010, se terminó la construcción de IceCube empezada 7 años atrás, durante cada verano austral (de noviembre a enero). Sin embargo, ya se tomaban datos de neutrinos desde el año 2000 en la Antártida con el observatorio de neutrinos AMANDA (Antartic Muon And Neutrino Detector) el cual, posteriormente llegó a formar parte de los subdetectores en IceCube y fue apagado en mayo de 2009. Otros subdetectores de IceCube son el arreglo IceTop ubicado en la superficie del glaciar y DeepCore uno interno de arreglo más denso.

2.2.1. Mecanismo

Los componentes interiores de IceCube consisten en 5160 módulos ópticos digitales (DOMs, Digital Optical Modules), cada uno con un tubo fotomultiplicador y su electrónica [Aartsen et al., 2017]. Los DOMs están ligados a cuerdas de cobre verticales en el interior de 86 pozos y ordenados en un kilómetro cúbico desde 1450 metros a 2450 metros de profundidad. Las cuerdas están ordenadas en forma hexagonal a una distancia de 125 metros, cada una con 60 DOMs a una distancia entre ellos de 17 metros (ver figura 2.6).

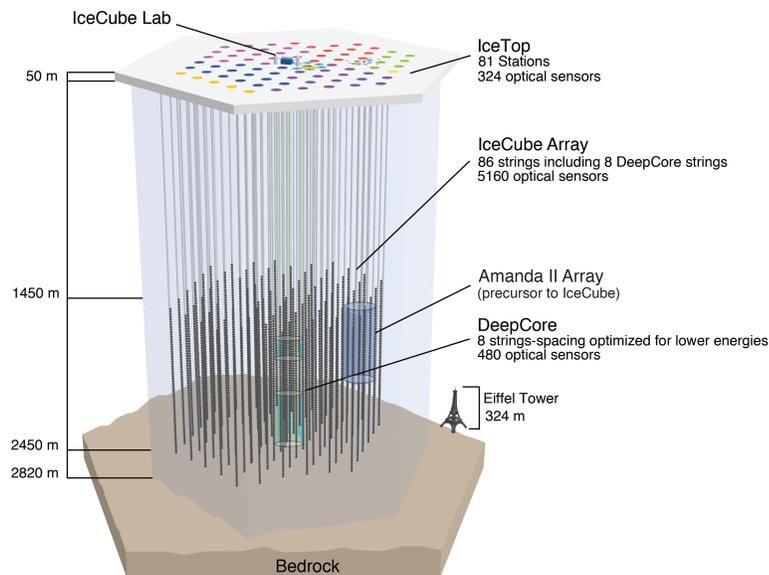


Figura 2.6. Esquema del observatorio IceCube. Comprende un volumen de 1 kilómetro cúbico de hielo cristalino en la Antártida con 5160 módulos ópticos digitales (DOMs) a profundidades entre 1450 a 2450 metros. El observatorio incluye los sub detectores IceTop y DeepCore (ref: Aartsen et al. [2017]).

El subdetector IceTop consiste en 81 estaciones ubicadas en la parte de arriba de

las 86 cuerdas. Cada estación tiene dos tanques equipados por dos DOMs al revés. IceTop se construyó como un detector de filtraje y calibración, también detecta cascadas provenientes de rayos cósmicos a energías de 300TeV a 1EeV¹⁰ [Aartsen et al., 2017]. Este subdetector mide la dirección de los rayos cósmicos entrantes del hemisferio sur así como el flujo y composición de los rayos cósmicos.

El subdetector DeepCore está formado por 8 de las 86 cuerdas ubicadas en el centro del arreglo de IceCube. Estas cuerdas están separadas a una distancia de 70 metros y con DOMs separados a 7 metros. Esta configuración más densa reduce el umbral de detección de energía de los neutrinos a 10GeV, dando lugar al estudio de oscilaciones de neutrinos.

La forma de detectar eventos de neutrinos con IceCube es por medio de la interacción débil de los neutrinos con el hielo antártico. En la interacción se producen leptones cargados (electrones, muones o taus). Estos leptones cargados pueden producir radiación Cherenkov si tienen energía suficiente. La radiación Cherenkov se produce cuando partículas cargadas viajan a una velocidad mayor a la de la luz en ese medio.

Hay dos marcas diferentes que determinan eventos de neutrinos en IceCube: (1) los eventos de trayectoria se originan de una interacción de corriente cargada¹¹ entre un neutrino muónico y un núcleo, produciendo una cascada hadrónica y un muón que emite radiación Cherenkov, formando un cono a lo largo de la trayectoria del muón. IceCube es más sensible a los muones que a otros leptones cargados porque estos tienen trayectorias más largas, a comparación de los electrones resultantes de un neutrino electrónico que usualmente sufre dispersión perdiendo energía y no alcanzando el umbral de la radiación Cherenkov. Y (2) los eventos cascadas electromagnéticas o hadrónicas que resultan de interacciones de cualquier sabor de neutrino¹² resultando en la creación de radiación en forma más esférica en el detector. Dado a que la cantidad de radiación generada en estas cascadas es proporcional a la energía, es más precisa la reconstrucción de la energía del neutrino en este tipo de eventos que para un evento de trayectoria, sin embargo la resolución aún es muy baja [Aartsen et al., 2017].

¹⁰1EeV = 10⁶ TeV

¹¹Interacción de corriente cargada: una forma de interacción de la fuerza débil. Las partículas mediadoras son los bosones W[±].

¹²Sabor de neutrino: electrón, muón, o tau.

La radiación Cherenkov se detecta en los tubos fotomultiplicadores dentro de los DOMs. La información es digitalizada en los DOMs y posteriormente es enviada a las computadoras del cuarto de control en el Laboratorio de IceCube (ICL) (ver figura 2.6) o, vía satélite, a laboratorios externos de Antártica, en donde se convierten en patrones de radiación para luego reconstruir la dirección y la energía de los muones y neutrinos [Aartsen et al., 2017].

2.3. Tercer Catálogo de Fermi LAT

Fermi LAT desde su lanzamiento en junio de 2008 ha revolucionado la manera de estudiar el cielo en rayos gamma. Varios catálogos con listas de fuentes astronómicas como púlsares, remanentes de supernova, destellos de rayos gamma y AGNs, a energías desde MeV a GeV han sido producidos (0FGL, 1FGL, 2FGL y 3FGL) [Acero et al., 2015]. Los AGNs que conforman los catálogos tienen, por su parte, catálogos propios: LBAS (LAT Bright AGN Sample, [Abdo et al., 2009]) es la primera muestra de AGNs con datos de tres meses de operación de LAT, 1LAC [Abdo et al., 2010c] y 2LAC [Ackermann et al., 2011] es el primero y segundo catálogo de la misión, respectivamente. Por último 3LAC [Ackermann et al., 2015], el tercer catálogo con datos de 4 años de operación. Este es la continuación de 2LAC y parte del catálogo general 3FGL de Fermi LAT [Acero et al., 2015]. Todos los catálogos, en especial 2LAC y 3LAC han dado lugar a varios trabajos de investigación como al estudio de las diferencias entre galaxias radio ruidosas y galaxias radio calladas y validar los modelos de la luz de fondo extragaláctico (Extragalactic Background Light, EBL), entre otros.

En este trabajo se presentan fuentes del 3LAC. El catálogo contiene 1591 fuentes localizadas a altas latitudes galácticas¹³ ($|b| > 10^\circ$) de las 3033 del catálogo general 3FGL. Entre los 1591 AGNs el 98 % son clasificados como blazares, por lo tanto, de ahora en adelante se hablará en su mayoría de blazares y no de AGNs en general. El 3LAC tiene mejoras en la selección de datos, en las funciones de respuesta del instrumento (IRFs) y en las técnicas de análisis de datos y contiene fuentes con un $TS > 25$ [Ackermann et al., 2015].

¹³Latitud galáctica es una coordenada que indica el ángulo que tiene un objeto con respecto al plano de la galaxia. Los ángulos son positivos al norte y negativos al sur.

A continuación se detalla el método de selección de AGNs, la forma de clasificación de AGNs y las características de las fuentes que conforman el catálogo 3LAC.

2.3.1. Procedimiento de selección

Los datos que conforman el 3FGL son los recolectados en los primeros 48 meses de la misión, desde el 4 de agosto del 2008 hasta el 31 de julio del 2012. En los tiempos en donde se recibió una cantidad extra de rayos gamma, como por ejemplo en los intervalos en los que hubieron detecciones de GRBs, en los tiempos de erupciones solares los datos fueron excluidos así como en los intervalos donde el Sol estuvo 3° por debajo del limbo de la Tierra (Earth's Limb ¹⁴) [Acero et al., 2015]. Igualmente, para reducir el ruido de rayos gamma provenientes del limbo de la Tierra, la nave espacial corta los tiempos cuando hay un ángulo de balanceo¹⁵ mayor a 52° y corta los eventos con ángulo de cenit mayor a 100° [Ackermann et al., 2015]. Los intervalos de tiempo en los que se recolectan datos se detallan con precisión en GTI (ver Software LAT: Fermi Science Tools).

El procedimiento de detección empezó en base a la lista de fuentes publicadas en el catálogo 2LAC y las fuentes que no alcanzaron un umbral de significancia para ese catálogo. Con esas fuentes se hizo un modelo optimizado usando un análisis de máxima verosimilitud y usando los datos Pass 7 reprocesados (P7REP). Pass 7 contiene un conjunto de parámetros para mediciones y análisis de datos como la escala de energía detectada en el LAT, la resolución de imagen en el calorímetro y funciones de respuesta del instrumento (P7REP_Source_V15), entre otros [Bregeon et al., 2013]. Una mejoría en este catálogo fue la actualización de estos conjuntos de datos (de P7 a P7REP) que permitió la adición o el mejor análisis de fuentes reportadas en 2LAC.

Otra forma de hacer cortes fue por medio del ajuste de modelos espectrales a las fuentes, la mayoría de ajustes fue con una función de ley de potencias ($dN/dE = N_0(E/E_0)^{-\Gamma}$) y una función Log Parábola ($dN/dE = N_0(E/E_0)^{-\alpha-\beta\log(E/E_0)}$) [Marsaro et al., 2004]. Donde N_0 es la amplitud de la función, Γ , α y β son parámetros espectrales y E_0 es una energía arbitraria de referencia. Cuando el logaritmo de

¹⁴Limbo de la Tierra o Earth's Limb: es una fuente de rayos gamma en la superficie de la Tierra creados por la colisión de rayos cósmicos con la atmósfera.

¹⁵Ángulo de balanceo o rocking angle: ángulo entre el cenit de la Tierra y la nave espacial.

la comparación entre estos dos ajustes es mayor que 8 (es decir, $TS_{curva} > 16$), los resultado de la funcion Log Parábola se eligen y significa que el espectro de la fuente es curvo. Sin embargo, para obtener el índice espectral de fotones¹⁶ (Γ) se ajusta utilizando una función de ley de potencias para todas las fuentes. Se aplica el umbral $TS = 25$ que equivale a una significancia de aproximadamente 4σ y con este criterio 1591 fuentes sobrevivieron al corte. Asimismo se hizo un corte de todas las fuentes que presentaban problemas como (1) la disminución de $TS < 25$ cuando se hizo cambio del modelo difuso, (2) el cambio de flujo de fotones ($>1\text{GeV}$) o el flujo de energía ($>100\text{MeV}$) a más de 3σ de significancia cuando se hacía cambio de modelo difuso y (3) el flujo de fotones de fuentes que tenían un vecino cercano muy brillante [Ackermann et al., 2015]. EL 91 % (1444 de 1591) de fuentes pasaron este corte. Esta muestra es la "muestra limpia" del catálogo 3LAC.

2.3.2. Clasificación de fuentes

Los criterios para definir un evento como AGN son, principalmente el espectro óptico y de forma secundaria características como la contraparte de radio (radio ruidosas o radio calladas), espectro en radio plano/empinado entre 1.4 GHz y 5GHz [Ackermann et al., 2015], emisión a varias longitudes de onda, variabilidad de flujo y polarización.

2.3.2.1. Clasificación óptica

Para clasificar ópticamente a una fuente se usaron datos de diferentes publicaciones, como el espectro óptico de Shaw et al. [2013], la clasificación de fuentes de la lista BZCAT (Catálogo multifrecuencia de blazares) de Massaro et al. [2009] y del espectro de fuentes de Ahn et al. [2012].

Entre las clasificaciones confirmadas de AGNs están los radio cuasáres de espectro plano (Flat-Spectrum Radio Quasars, FSRQ), los BL Lac, las radio galáxias, radio cuasáres de espectro empinado (Steep-Spectrum Radio Quasars, SSRQ), Seyfert II y Seyfert I de líneas delgadas (Narrow-Line Seyfert 1, NLSy1). En las clasificaciones tentativas están los candidatos a blazares de tipo desconocido (Blazar Candidates of Uncertain type, BCU) porque presentan características mezcladas

¹⁶Flujo espectral de fotones: es el número de fotones por unidad de frecuencia por unidad de área por unidad de tiempo. Se define como $N(E) \propto E^{\gamma-1}$, donde el índice espectral de fotones $\Gamma = \gamma-1$

entre FSRQ y BL Lac, por ejemplo, los BCU I presentan una contraparte en óptico; los BCU II no tienen contraparte en óptico pero su espectro presenta el pico sincrotrón característico de los AGNs; los BCU III sin contraparte en óptico ni pico sincrotrón pero tienen emisión de varias longitudes de onda y un espectro plano o los BCU-AGN que tienen un espectro característico de objetos de AGNs y son radio ruidosos, pero no hay suficientes datos para concluir la clase a la que pertenecen.

2.3.2.2. Clasificación por la distribución espectral (SED)

Para caracterizar mejor las fuentes en el 3LAC, se estudió su espectro de energía usando todos los datos disponibles en la literatura.¹⁷

Se usó un valor estimado (en un marco de referencia en reposo) de la frecuencia ν_{pico}^s del pico sincrotrón en el SED (ver capítulo 1) por medio del ajuste de un polinomio de 3er grado, para clasificar a las fuentes como blazares de pico sincrotrón bajo (LSP, con $\nu_{pico}^s < 10^{14}\text{Hz}$), blazares de pico sincrotrón intermedio (ISP, si $10^{14}\text{Hz} < \nu_{pico}^s < 10^{15}\text{Hz}$), o blazares de pico sincrotrón alto (HSP, donde $\nu_{pico}^s > 10^{15}\text{Hz}$).

Las distribuciones de ν_{pico}^s para blazares FSRQ y BL Lacs se muestran en la figura 2.7. La distribución de los FSRQ se distribuyen al rededor de $\nu_{pico}^s = 10^{13}\text{Hz}$, mientras en los BL Lacs la frecuencia pico se distribuye en LSP, ISP y HSP. Los BCU no presentan un comportamiento que parece de los BL Lac pero tiene picos a energías bajas como los FSRQ.

¹⁷Se usó el constructor de distribuciones espectrales de energías (SED) en línea: <http://tools.asdc.asi.it/SED/>.

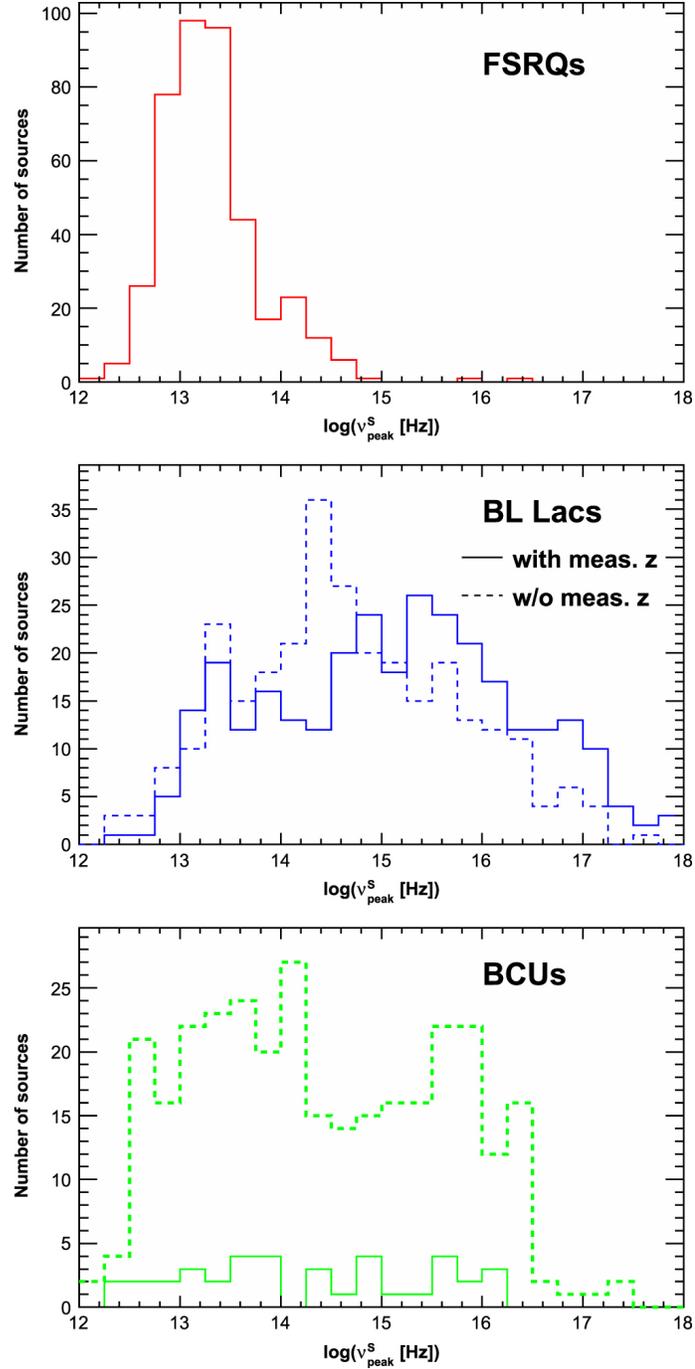


Figura 2.7. Histogramas de la cantidad de fuentes con una determinada frecuencia pico ν_{pico}^s para el pico sincrotrón del SED. De arriba a abajo, la primera gráfica es para las fuentes FSRQ, la segunda para las fuentes BL Lac y la última para las fuentes de tipo desconocido BCU. Los histogramas con líneas punteadas pertenecen a fuentes sin un corrimiento al rojo (z) medido, las líneas continuas sí presentan un z medido por lo que la corrección $1+z$, debida al marco de referencia en reposo, fue aplicada a estas fuentes. [Acero et al., 2015]

2.3.3. Propiedades de fuentes

El catálogo 3LAC incluye 1591 fuentes con 467 FSRQ, 632 BL Lac, 460 BCU y 32 AGNs que no son blazares. La muestra limpia de este catálogo se compone de 1444 objetos con 414 FSRQ, 604 BL Lac, 402 BCU y 24 AGNs no blazares. Las propiedades de estas fuentes se detallan a continuación.

2.3.3.1. Índice espectral de fotones (Γ_p)

Las nuevas fuentes FSRQ detectadas con 3LAC presentan un índice espectral promedio de fotones más suave que en 2LAC (2.53 ± 0.03 vs. 2.41 ± 0.01) [Ackermann et al., 2015], indicando que con este catálogo se detectan blazares a menores energías. Para los blazares BL Lac no hay una diferencia significativa entre 2LAC y 3LAC y para los BCU, las nuevas fuentes presentan un aumento del índice espectral de fotones ($\Gamma_p > 2.4$) lo cual muestra un parecido con los blazares FSRQ. Para probar esta similitud, se observa una anticorrelación entre la posición del pico microtrón ν_{pico}^s y el índice espectral de fotones. Entre un Γ_p mayor, se observa un ν_{pico}^s menor, que es lo que sucede entre los FSRQ y BCU con los BL Lac.

2.3.3.2. Corrimiento al rojo (z)

La distribución de corrimientos al rojo no tiene mucha diferencia respecto al 2LAC. Sin embargo, para blazares FSRQ, el z de las fuentes es más alta ($\langle z \rangle = 1.33 \pm 0.08$ vs. 1.17 ± 0.03) [Ackermann et al., 2015]. El z máximo para un FSRQ es de 3.1 y no ha variado desde 1LAC. Con esto se concluye que las fuentes FSRQ aumentan considerablemente entre ≈ 0.5 a 2.0. Para BL Lacs, el corrimiento al rojo llega a un máximo de $z=0.3$. La distribución de corrimientos al rojo va aumentando conforme se pasa de HSP-BL Lacs a LSP-BL Lacs.

Entre los BL Lacs, 309 fuentes tienen corrimiento al rojo medido, mientras 209 no. Las fracciones de BL Lac sin corrimiento al rojo se distribuyen en 55 % para LSPs, 61 % ISP y 40 % para HSPs. Sin embargo, Shaw et al. [2013] ha propuesto intervalos de corrimiento al rojo obteniendo los límites superiores, de forma estadística, por medio de la ausencia de absorción de la línea Ly α y los límites inferiores con la no detección de la galaxia anfitriona.

2.3.3.3. Luminosidad

La luminosidad en rayos gamma ha sido calculada para flujos de energía entre 100 MeV y 100 GeV. La relación entre luminosidad y corrimiento al rojo se ha reportado en los catálogos anteriores: los blazares BL Lac de luminosidad baja ($<10^{45}$ erg s^{-1}) no pueden ser detectados a $z>0.4$, las fuentes con luminosidades mayores a 5×10^{47} erg s^{-1} pueden ser detectadas hasta $z>3.2$. Ajello et al. [2013] encontró una correlación pequeña pero importante entre la luminosidad de rayos gamma e índice espectral cuando se incluyen las restricciones del corrimiento al rojo de Shaw et al. [2013].

2.3.3.4. Curvatura del espectro

Una característica muy notada desde 1LAC es la curvatura en el espectro de muchos blazares FSRQ y LSP/ISP-BL Lac. [Abdo et al., 2010b]. Como se mencionó antes, en el catálogo 3LAC, las fuentes se ajustan a una ley de potencias o a una función log parábola, y se toma la segunda cuando $TS_{curva} > 16$, excepto en algunos casos en los que ninguna es un buen ajuste por lo que se usan combinaciones de funciones como ley de potencias+exponencial cortada. Un total de 91 fuentes FSRQs, 32 BL Lacs y 8 BCUs muestran curvatura a un nivel de confianza $>99\%$.

Los espectros más curvos son de los blazares FSRQ. Todos los FSRQ brillantes tienen un espectro curvo, a diferencia de los BL Lac con una situación más diversa: para los LSP la fracción de fuentes con espectro curvo es 70%, para los ISP es 32% y para los HSP es 18%. Por lo tanto, la mayor parte de fuentes BL Lac se modelan con una ley de potencias y los FSRQ con una función log parábola.

2.3.3.5. Variabilidad

La variabilidad es una característica clave de los blazares. Aunque se detecta variabilidad en todas las escalas temporales de los blazares, los datos agrupados en espacios temporales de 1 mes representan el punto medio entre agrupaciones de datos pequeñas para detectar picos de actividad en fuentes brillantes y agrupaciones de datos grandes para detectar fuentes débiles.

Al igual que en 2LAC, 3LAC encontró que los FSRQ son variables en 68% de los casos, los BL Lac son menos variables (23% en promedio), con un comportamiento

decreciente a medida que el ν_{pico}^s crece: 39 % para LSP, 23 % para ISP y 15 % para HSP. Para BCUs, se observa un 21 % de variabilidad.

3. Muestra

El presente trabajo de tesis se centra en el estudio y comparación de una muestra de cuatro blazares: Mkn 421, TXS 0506+056, OP 313 y 3C 279. Cada uno con características que los diferencian, por ejemplo, el tipo de clase óptica, el tipo de modelo espectral y en función de la energía en la que se encuentra el pico sincrotrón. Otras características son la distancia en la que se ubican, la intensidad del flujo de radiación y se detalla si presentan correlación con eventos de neutrinos extragalácticos. En la siguiente sección se describe cada uno.

3.1. Markarian 421 (Mkn 421)

Visto por primera vez por el Observatorio Whipple en 1992 [Punch et al., 1992], el blazar Markarian 421 (3FGL J1104.4+3812 o Mkn 421, de ahora en adelante) se ubica en el hemisferio norte con coordenadas AR= 166.114° y Dec= 38.209°. Tiene un núcleo puntual de $\approx 3.6 \times 10^8$ masas solares [Wagner and Collaboration, 2008] y es una de las fuentes más estudiadas dado su cercanía y su magnitud aparente de 12.9 reportada por SIMBAD¹. Mkn 421 es uno de los blazares más cercanos a la Tierra con corrimiento al rojo de $z = 0.031$, que equivale a 434 millones de años luz de la Tierra.

Se muestra en la figura 3.1 la curva de luz de 10 años de observación, desde el 01 de septiembre del 2008 al 01 de septiembre del 2018 en un rango de energía de 100 MeV a 300 GeV observada por Fermi-LAT. Aproximadamente desde junio hasta septiembre del 2012 se observa la actividad más grande de esta fuente, llegando a un flujo máximo de $9.34 \pm 0.59 \times 10^{-07}$ fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La fuente se clasifica como BL Lac ya que tiene un espectro óptico sin líneas

¹SIMBAD (Set of Identifications, Measurements and Bibliography for Astronomical Data): es una base de datos astronómicos de objetos fuera del Sistema Solar. Es mantenido por Centre de données astronomiques de Strasbourg (CDS), Francia.

de emisión [Liu et al., 1997] y flujos muy variables en diferentes longitudes de onda. Mkn 421 tiene la distribución espectral característica de los AGNs de dos picos con el primero (pico sincrotrón) en aproximadamente en $\text{Log}\nu_{\text{pico}}^s = 17.07 \text{ Hz}^2$ ($\sim 4.43 \times 10^{-4} \text{ MeV}$) (ver figura 3.2) lo que la convierte de tipo HSP y el espectro en rayos gamma se modela con una ley de potencias característica de los blazares BL Lac.

En la figura 3.2 se muestra la distribución espectral multifrecuencia obtenida con datos de varios detectores.

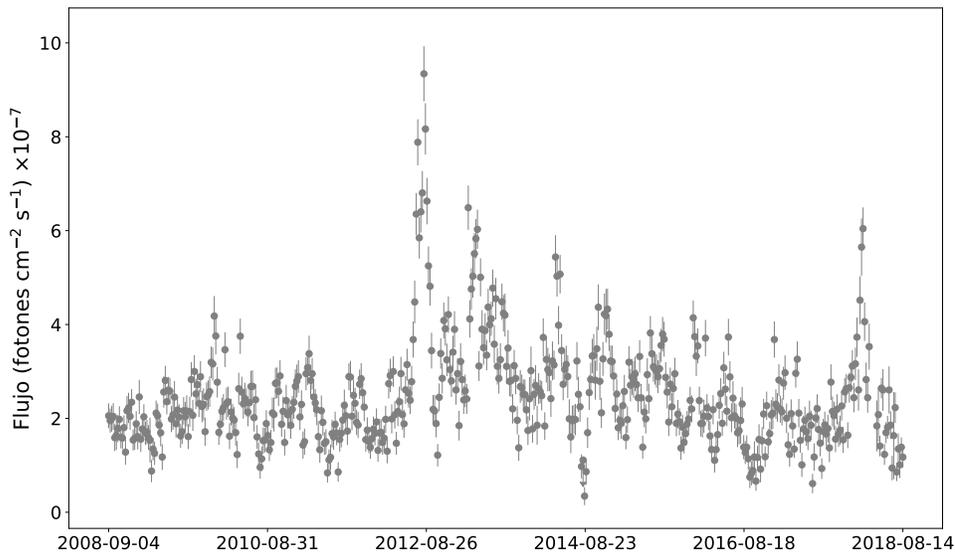


Figura 3.1. Gráfico de la curva de luz de Markarian 421 de 10 años, con episodios temporales de 1 semana. Se observa que el comportamiento de Mkn 421 es altamente variable. Dado a que es un objeto muy brillante los flujos en la curva de luz no presentan límites superiores. La curva de luz fue obtenida asumiendo un ajuste de ley de potencias a la distribución espectral y tomando en cuenta una contribución EBL con el modelo de Franceschini et al. [2008].

²Dato obtenido de la versión interactiva del 3er catálogo de Fermi LAT. <http://www.asdc.asi.it/fermi3lac/>

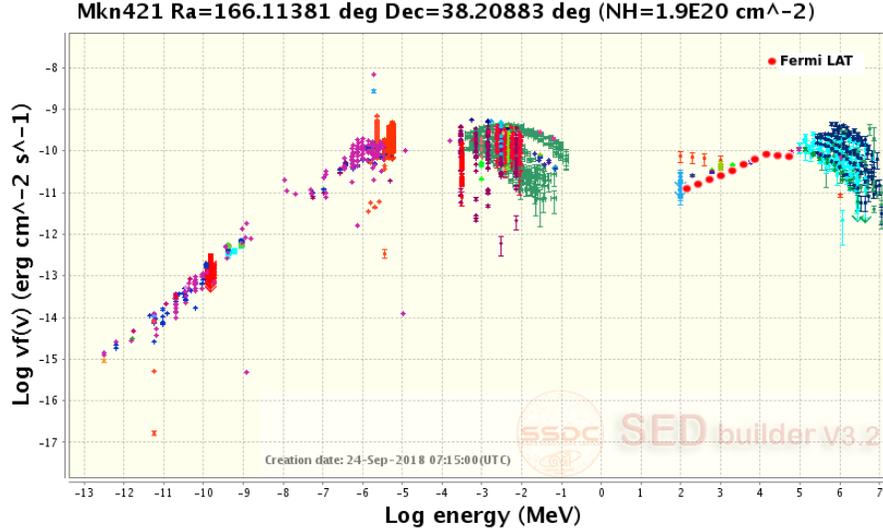


Figura 3.2. Distribución espectral multifrecuencia de Mkn 421. Los puntos rojos en el rango de energías de 100 MeV a 300 GeV son los datos obtenidos con Fermi LAT, los puntos violeta pertenecen a NED en energías desde radio hasta TeV, los rojos no circulares son del proyecto CRTS a energías desde el óptico hasta ultra violeta. En energías de TeV están las observaciones recopiladas en BSDC con datos de MAGIC en color verde y de VERITAS en color azul oscuro. Datos obtenidos en <https://tools.ssd.asi.it/>

3.2. TXS 0506+056

El blazar TXS 0506+056 es de tipo BL Lac está ubicado en el hemisferio norte con coordenadas AR= 77.35° y Dec= 5.69° y con un corrimiento al rojo reportado de $z = 0.3365 \pm 0.0010$ [IceCube Collaboration et al., 2018]. Para este trabajo se utilizó un periodo de observación por Fermi LAT a energías entre 100MeV a 300 GeV de 10 años: desde el 01 de septiembre del 2008 al 01 de septiembre del 2018.

El 22 de septiembre del 2017, IceCube, detectó un evento de neutrino (170922A) de energía entre 183 a 290 TeV, en coincidencia espacial con TXS 0506+056, dentro de una incerteza de 6 arcominutos del evento de neutrino [IceCube Collaboration et al., 2018]. Coincidentemente, TXS 0506+056 había presentado un incremento de flujo de radiación desde abril del 2017 visto a energías de GeV por la misión Fermi LAT.

La curva de luz, una gráfica que muestra el comportamiento del flujo en función del tiempo, de TXS 0506+056 (ver Figura 3.3) muestra actividad constante a lo largo del tiempo de observación hasta mostrar un incremento a partir de abril 2017.

El flujo máximo de este pico de actividad fue en la primera semana de julio 2017 con un valor de $5.44 \pm 0.57 \times 10^{-7}$ fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Cada punto en la curva de luz presentada es un episodio temporal de 7 días, es decir, cada punto contiene el promedio de los datos acumulados en una semana por el detector.

Su clase espectral es ISP (intermediate-synchrotron peaked) con un valor de $\text{Log} \nu_{\text{pico}}^s = 14.22 \text{ Hz}$ o $\sim 6.86 \times 10^{-7} \text{ MeV}$. El espectro de la fuente en rayos gamma se modela con una función de Ley de Potencias y en la figura 3.4 se muestra el espectro multifrecuencia de la fuente.

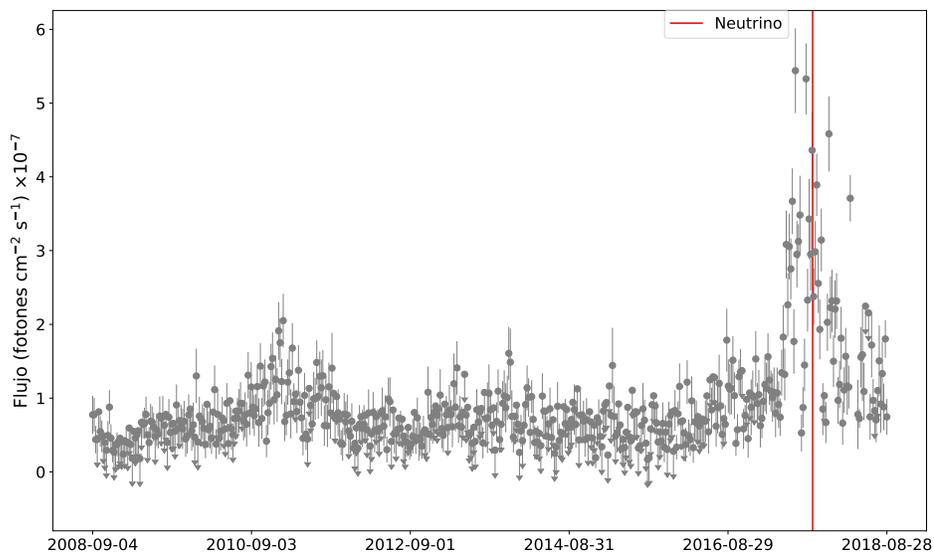


Figura 3.3. Gráfico de flujo (fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) vs. tiempo en sistema de tiempo gregoriano de TXS 0506+056 para 10 años. Cada punto de la gráfica corresponde a un episodio temporal de 1 semana y la línea roja continua es el tiempo en el cual se detectó el evento de neutrino IceCube-170922A. Se presentan los puntos de flujo con sus errores y los puntos con una flecha hacia abajo indican límites superiores. Esta curva de luz fue obtenida asumiendo un ajuste de ley de potencias a la distribución espectral y tomando en cuenta una contribución EBL con el modelo de Franceschini et al. [2008].

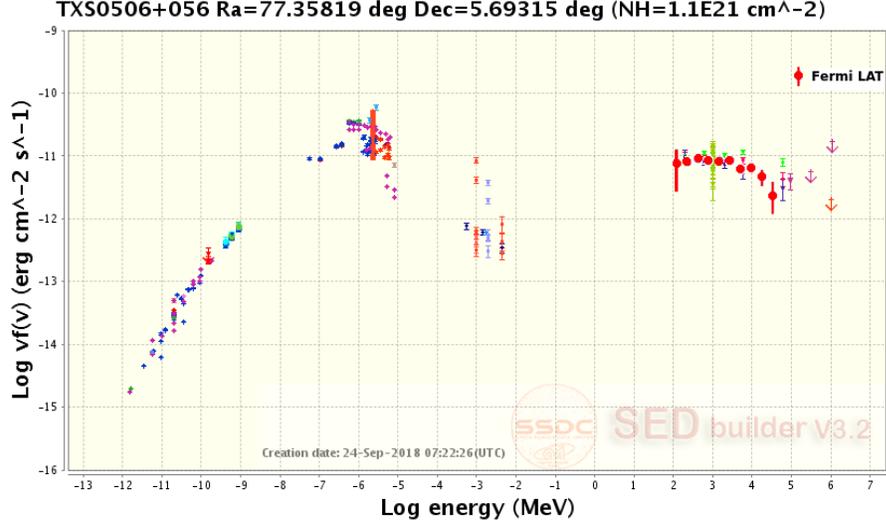


Figura 3.4. Distribución espectral histórica de TXS 0506+056 generada con datos recolectados de varias misiones. Los puntos rojos circulares son los observados por Fermi LAT. Los puntos violeta pertenecen a NED (The NASA/IPAC Extragalactic Database) a energías desde radio hasta óptico, los rojos no circulares son del proyecto CRTS (Catalina Real-Time Transient Survey) a energías desde el óptico hasta ultra violeta. En energías de TeV están las observaciones de BSDC (The Brazilian Science Data Center) con MAGIC en color verde y en color azul oscuro las de BSDC-VERITAS. El encabezado muestra las coordenadas espaciales en grados y la densidad columnar (NH) en partículas cm^{-2} . El gráfico fue obtenido en <https://tools.ssdc.asi.it/>

3.3. OP 313

El blazar OP 313 clasificado como de tipo FSRQ, localizado en el hemisferio norte con coordenadas $AR = 197.619^\circ$ y $Dec = 32.345^\circ$. Con corrimiento al rojo $z = 0.997$ es el blazar más lejano de la muestra de este trabajo.

El 15 de mayo del 2012 se detectó un candidato de evento de neutrino por el experimento IceCube [Aartsen et al., 2016] en las coordenadas $AR = 198.740^\circ$ y $Dec = 31.96^\circ$ con una diferencia de $< 2^\circ$ con las coordenadas espaciales de OP 313. Sin embargo esta detección no coincide con un incremento de actividad en el blazar. En OP 313 se indentifica claramente un incremento de actividad unicamente en abril del 2014 (ver figura 3.5).

La clase espectral de OP 313 es LSP, con $\text{Log} \nu_{\text{pico}}^s = 13.3 \text{ Hz}$ ($\sim 8.25 \times 10^{-8} \text{ MeV}$). La función para modelar el espectro en rayos gamma es una log parábola, característica de fuentes tipo FSRQ. En la figura 3.6 se muestra la distribución es-

pectral multifrecuencia visto por varios instrumentos con datos de diferentes épocas.

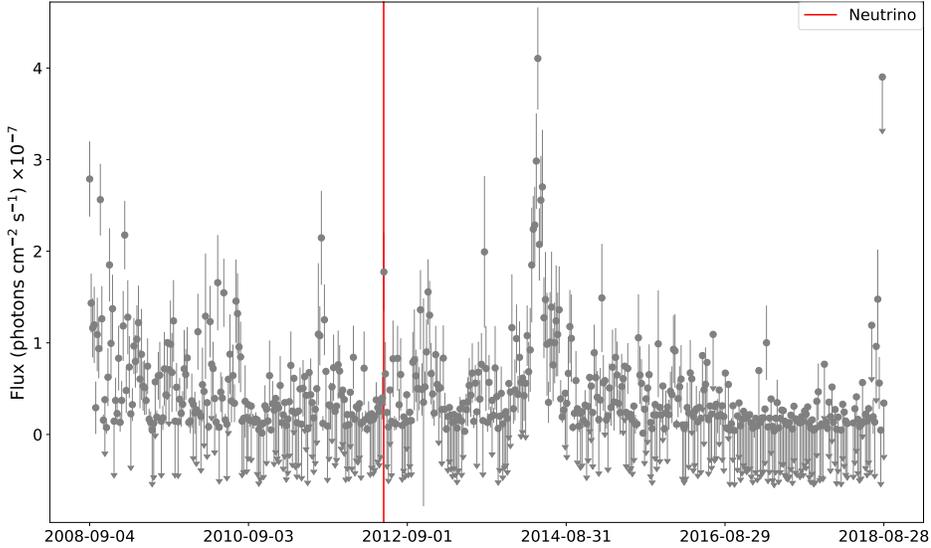


Figura 3.5. Curva de luz de OP 313 para 10 años de observación desde el 01 de septiembre del 2008 hasta el 01 de septiembre del 2018 con Fermi LAT (a energías de 100 MeV a 300 GeV). Fermi observa un aumento de actividad prominente por aproximadamente dos meses en el 2014 (abril a junio). La línea roja continua representa el tiempo en que IceCube detectó el evento de neutrino. La curva de luz fue obtenida asumiendo un ajuste de una función log parábola a la distribución espectral y tomando en cuenta una contribución EBL con el modelo de Franceschini et al. [2008].

3.4. 3C 279

El blazar 3C 279 fue la primera fuente detectada por el instrumento EGRET [Hartman et al., 1992] de la misión CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory), predecesora de Fermi. Y como resultado el AGN tiene, más que otra fuente, datos publicados en multifrecuencias y un SED bien mapeado.

El blazar 3C 279 es de tipo FSRQ presenta un corrimiento al rojo de $z=0.538$ [Burbidge and Rosenberg, 1965], con un agujero negro de rango de masa $3-8 \times 10^8$ masas solares [Woo and Urry, 2002] y un chorro a $\leq 2^\circ$ del observador [Lister et al., 2013] con alcances a escalas de kiloparsecs [Cheung, 2002]. Exhibe velocidades superlumínicas desde 4 hasta 20 veces la velocidad de la luz [Lister et al., 2013] y dada su fuerte polarización óptica (lineal y circular en el chorro) [Wardle et al., 1998]

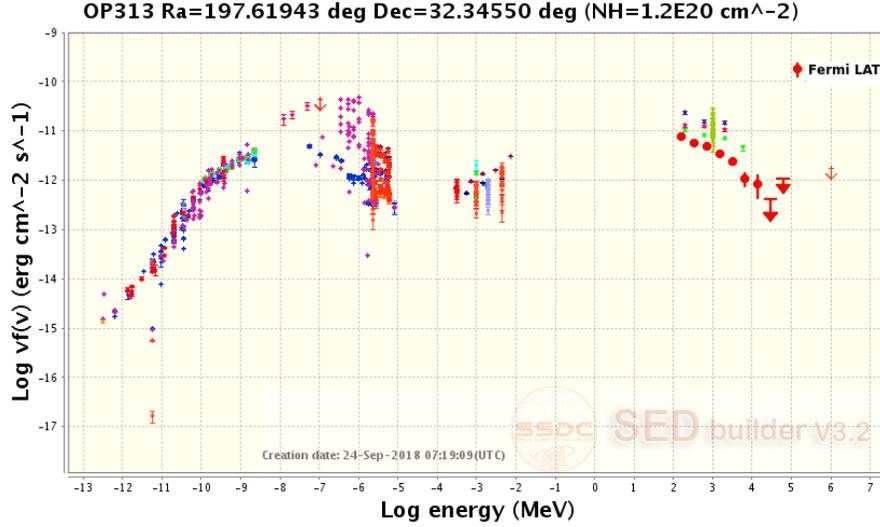


Figura 3.6. Distribución espectral de OP 313. Los puntos rojos circulares son los observados por Fermi LAT hasta energías de GeV. Los puntos del primer pico fueron tomados de NED de longitudes de onda desde radio hasta rayos X.

y muy alta variabilidad de flujo, 3C 279 se clasifica como un FSRQ de tipo OVV (Optically Violently Variable).

En la figura 3.7 se presenta la curva de luz de 3C279 en un rango de tiempo de 10 años entre el 01 septiembre de 2008 al 01 de septiembre 2018. En diciembre 2013 la fuente entró en una fase brillante, de rápida variabilidad, llegando a un flujo de 10^{-5} fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ en energías $E > 100 \text{ MeV}$ en escalas de tiempo de horas [Hayashida et al., 2015] y en junio 2015 se observó un pico de alta actividad llegando a un flujo máximo de 9.6×10^{-6} fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ visto a energías de 100 MeV a 300 GeV [Ackermann et al., 2016]. 3C 279 tiene el récord del flujo más alto visto por Fermi LAT con 1.99×10^{-5} fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, el cual se observó a inicios del año 2018 (ver figura 3.7).

Al igual que la mayoría de blazares tipo FSRQ, el tipo espectral en rayos gamma es log parábola, la clase espectral es LSP, con el pico sincrotrón a $\text{Log} \nu_{\text{pico}}^s = 13.11$ Hz, es decir a $5.33 \times 10^{-8} \text{ MeV}$. El SED multifrecuencia se muestra en la figura 3.8.

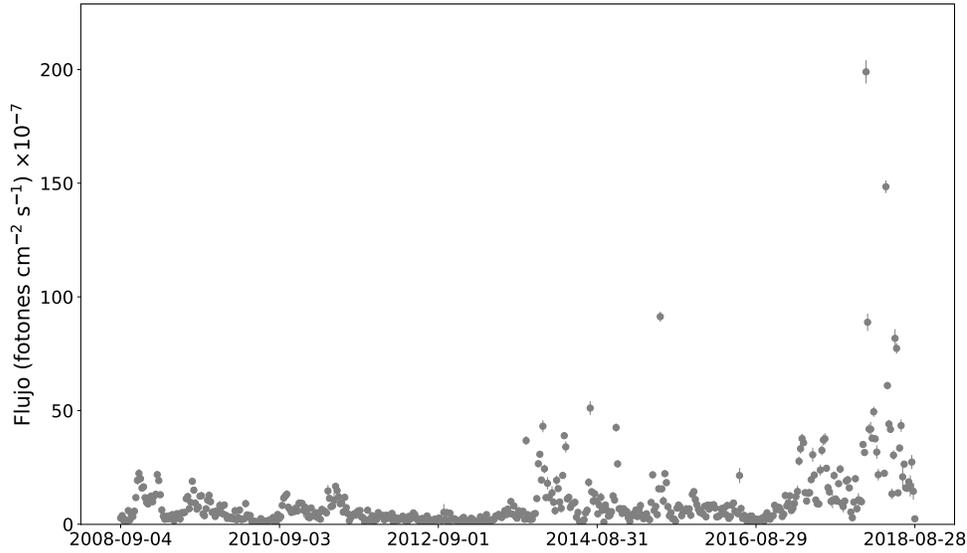


Figura 3.7. Curva de luz del blazar 3C279 de 10 años de observación de Fermi LAT a energías de 100MeV a 300GeV. Se observa el pico en el 2015 y el pico más prominente del 2018. Dado a sus flujos tan altos, 3C 279 es un objeto interesante de estudio. Su curva de luz no presenta límites superiores.

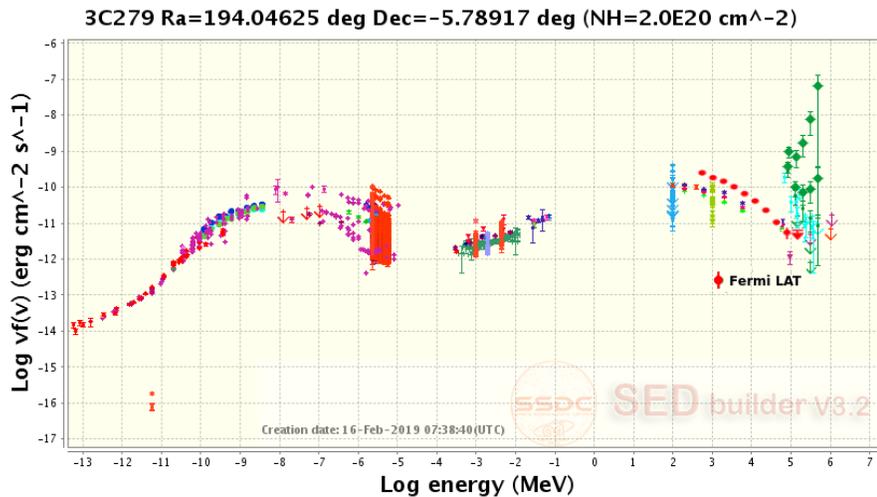


Figura 3.8. Distribución espectral multifrecuencia de 3C279. Los puntos rojos circulares son los observados por Fermi LAT. Los puntos recopilados por el proyecto CSRT (Catalina Real-Time Transient Survey) desde 10^{-13} hasta 10^{-2} MeV son los rojos no circulares, los puntos violetas son parte de NED (The NASA/IPAC Extragalactic Database) a energías desde 10^{-10} hasta 10^{-5} MeV, a energías de TeV en color azul están los datos de VERITAS y en color verde los datos de MAGIC. La curva de luz fue obtenida asumiendo un ajuste de una función log parábola a la distribución espectral y tomando en cuenta una contribución EBL con el modelo de Franceschini et al. [2008].

3.5. Ciclo de actividad

Entre los tipos de AGNs los blazares muestran una fuerte variabilidad en rayos gamma así como a otras frecuencias de la distribución espectral (SED). La variabilidad en rayos gamma ocurre a diferentes escalas de tiempo, desde minutos (como 3C 279 [Hayashida et al., 2015]) hasta meses (por ejemplo, TXS 0506+056 IceCube Collaboration et al. [2018]).

A diferencia de otros objetos variables como las estrellas Cefeidas, los púlsares o las binarias eclipsantes que tienen variabilidad periódica y simple que los hace fácil para el estudio, los blazares presentan una variabilidad caótica, impredecible dado a tantos procesos físicos que producen la misma. Esto hace que sea difícil cuantificar parámetros importantes como la actividad.

La variabilidad consiste en que cada objeto pasa un periodo de tiempo t con flujo a nivel bajo antes de emitir un pico de rayos gamma con duración τ a un nivel alto de flujo y luego regresa a un nivel bajo. Una forma para cuantizar la actividad de una fuente es por medio del ciclo de actividad. Este se define como:

$$DC = \frac{\sum_i \tau_i}{T} \quad (3.1)$$

donde $\sum_i \tau_i$ es el tiempo en estado activo y $T = \tau + t$ es el tiempo completo de observación.

El ciclo de actividad (Duty Cycle como se conoce en inglés) es el porcentaje de tiempo en el que un sistema está en un estado de actividad respecto al tiempo total.

En sistemas astrofísicos es necesario definir un umbral para saber cuándo el flujo de una fuente se considera en estado activo, el umbral depende de la definición del flujo base el cual se asocia al límite superior de la fase no activa. La definición de flujo base varía de autor en autor (ver Krawczynski et al. [2004]), el flujo base debe ser estable y constante en el tiempo aunque puede presentar variaciones intrínsecas [Patricelli et al., 2014]. El objeto estará en estado activo o fase activa cuando el flujo de radiación sea mayor que un flujo umbral.

El error de la ecuación (3.1) se obtiene mediante la propagación del error en la medición del tiempo de la siguiente forma: $DC[(\sigma_t/T) + (\tau\sigma_t/T^2)]$ [Taylor, 2014].

En este trabajo se obtiene el ciclo de actividad de las cuatro fuentes de la muestra: TXS 0506+056, OP 313, Mkn 421 y 3C 279 utilizando varias definiciones de flujo base y estado activo.

3.5.1. Criterio propuesto por Vercellone et al. [2004]

En el trabajo de Vercellone et al. [2004] para estimar el nivel de actividad en rayos gamma, se encuentra el número de veces en la que una fuente está en un estado alto (HSN, Number of High State), es decir, cuando el flujo es mayor a un umbral dado.

Vercellone et al. [2004] utiliza el flujo promedio ponderado como flujo base. En este trabajo, debido a la presencia de muchos límites superiores en las fuentes de la muestra, se utilizó únicamente el promedio del flujo. Se establece que una fuente está en estado activo cuando (1) el umbral es 1.5 veces el flujo promedio de la fuente y (2) el valor de flujo- σ debe ser mayor que el flujo promedio, donde σ es la incerteza de la medida de los flujos. Se muestra en la figura 3.9 la curva de luz de Mkn 421 con el umbral de actividad.

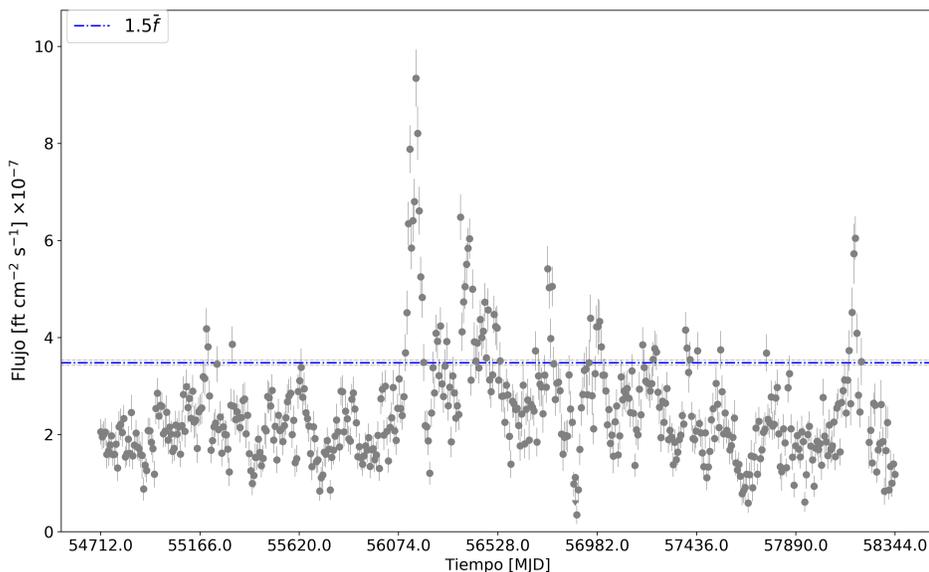


Figura 3.9. Curva de luz de Mkn 421 con episodios temporales de una semana. La línea horizontal azul indica el umbral de actividad usado en Vercellone et al. [2004] con un valor de $1.5\bar{f} = 3.48 \pm 0.05 \times 10^{-7} \text{ ft cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El error se obtiene obteniendo la desviación estándar del flujo promedio ($\Delta\bar{f} = \sigma_{\bar{f}}/\sqrt{n}$, donde n es el número de puntos de flujo.)

3.5.2. Criterio de zonas inactivas

En este criterio se define el flujo base como el promedio obtenido de los flujos que se encuentran bajo el flujo promedio, para evitar considerar fases activas.

Al igual que el criterio Vercellone et al. [2004] una fuente está en estado activo cuando (1) el flujo es mayor que 1.5 veces el flujo base dado por el promedio de las fases inactivas, (2) la diferencia flujo $-\sigma$ es mayor que el flujo base.

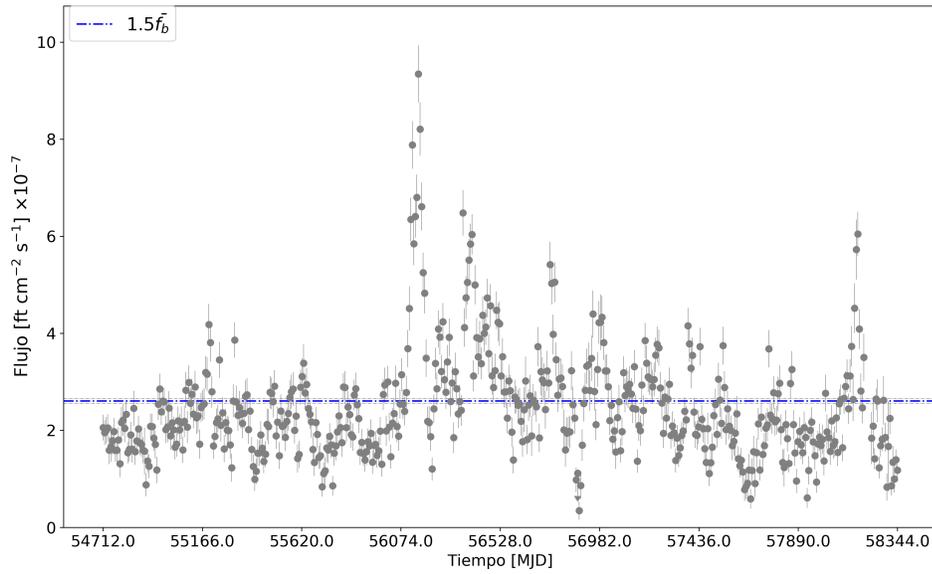


Figura 3.10. Curva de luz de Mkn 421 con episodios temporales de una semana. La línea horizontal azul indica el umbral de actividad usado en el criterio de valor promedio en fases inactivas de $1.5\bar{f}_b = 2.61 \pm 0.05 \times 10^{-7} \text{ ft cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El error se obtiene obteniendo la desviación estándar del flujo de las zonas inactivas ($\Delta\bar{f}_b = \sigma_{\bar{f}_b}/\sqrt{n}$, donde n es el número de puntos de flujo.)

3.5.3. Criterio Tluczykont et al. [2007]

El uso del flujo promedio como flujo base no es un buen indicador para definir un umbral ya que los mismos valores se obtienen considerando flujos bajos como flujos altos.

Se define, desde un método estadístico, el flujo base usando la distribución de frecuencias de los flujos en el tiempo completo de observación. Esta distribución puede ser bien descrita por medio de la suma de una función Gaussiana más una función log-normal (ver figura 3.11) [Limpert et al., 2001].

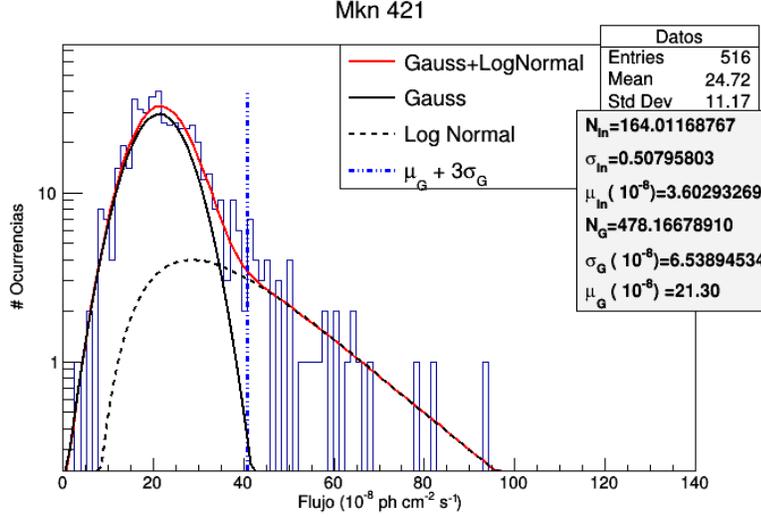


Figura 3.11. Distribución de frecuencias de flujo para el blazar Mkn 421. La curva continua color negro es el ajuste de la función Gaussiana, la curva punteada es el ajuste log-normal y la curva roja continua es el ajuste de la suma de ambas funciones. El intervalo de flujo base va desde cero hasta el centro de la gaussiana. La línea azul punteada es el umbral definido como $\mu_G + 3\sigma_G$.

Bajo este criterio, un flujo en estado no activo se describe con una distribución Gaussiana [Tluczykont et al., 2007], por ende el estado base comprende entre los límites cuando el flujo es cero y en el valor de la media del ajuste de la distribución. La distribución log-normal, por su parte, describe una población de flujo estocástico gobernada por un proceso multiplicativo, y se adjudica a niveles de alta actividad [Tluczykont et al., 2007].

La definición de ciclo de actividad presentada en la ecuación 3.1 puede ser reescrita tomando en consideración la fluencia³ total de la fuente [Patricelli et al., 2014], que es:

$$\bar{f} \times T_{fermi} = F_b \times T_b + \mathcal{F}_{picos} \quad (3.2)$$

donde \bar{f} es el flujo promedio de la fuente, T_{fermi} es el tiempo total de observación de Fermi, es decir, 10 años desde septiembre 2008 a septiembre 2018, F_b es el flujo base, T_b es la tiempo de duración en el flujo base y \mathcal{F} es la fluencia de los estados activos ($\mathcal{F}_{picos} = \sum_i f_{picos,i} T_{picos,i}$). Por lo tanto $T_{fermi} = T_b + T_{picos}$. Utilizando la nueva definición del ciclo de actividad, a parte de tomar en consideración el flujo

³La fluencia es el flujo de fotones por unidad de área integrado en todo el tiempo de observación, ($\mathcal{F} = \text{flujo} \times \text{tiempo}$), [\mathcal{F}] = fotones cm^{-2} .

base, debe considerarse el flujo activo promedio.

Se usa la función presentada en Tluczykont et al. [2007] para calcular el flujo activo promedio $\langle f_{picos} \rangle$:

$$\langle f_{picos} \rangle = \frac{\int_u^{F_{max}} x f(x) dx}{\int_u^{F_{max}} f(x) dx} \quad (3.3)$$

donde $f(x)$ es la función log normal, F_{max} es el flujo máximo de la distribución, u es el umbral de flujo activo definido como $\mu_G + 3\sigma_G$, el flujo base más 3 niveles de confianza de la distribución Gaussiana. De esta forma se asegura que se está dejando fuera el 95.5 % de datos contenidos en la distribución Gaussiana, asociada a estados no activos.

La fluencia de los estados activos, \mathcal{F}_{picos} (ecuación 3.2) puede ser escrita en términos de $\langle f_{picos} \rangle$ de la siguiente manera:

$$\mathcal{F}_{picos} = \langle f_{picos} \rangle \times T_{picos} \quad (3.4)$$

Insertando la ecuación (3.2) en la ecuación (3.4), se tiene:

$$\begin{aligned} \bar{f} \times T_{fermi} &= F_b \times T_b + \langle f_{picos} \rangle \times T_{picos} \\ \bar{f} \times T_{fermi} - F_b \times T_b &= \langle f_{picos} \rangle \times T_{picos} \\ \bar{f} \times T_{fermi} - F_b \times (T_{fermi} - T_{picos}) &= \langle f_{picos} \rangle \times T_{picos} \\ (\bar{f} - F_b) \times T_{fermi} &= -F_b \times T_{picos} + \langle f_{picos} \rangle \times T_{picos} \end{aligned}$$

Despejando para T_{picos} :

$$T_{picos} = \frac{(\bar{f} - F_b) T_{fermi}}{\langle f_{picos} \rangle - F_b} \quad (3.5)$$

Y sustituyendo la ecuación (3.5) en la ecuación (3.1), el ciclo de actividad puede expresarse como:

$$DC = \frac{(\bar{f} - F_b)}{\langle f_{picos} \rangle - F_b} \quad (3.6)$$

El ciclo de actividad (DC) se define ahora en términos del flujo promedio (\bar{f}), del flujo activo promedio ($\langle f_{picos} \rangle$) y del flujo base (F_b). El error de la ecuación (3.6) se da por la propagación del error del flujo promedio: $\Delta DC = DC[\sqrt{(\sigma_f/f\sqrt{n})^2}]$, los errores de las otras variables no son significativos por lo que no se toman en

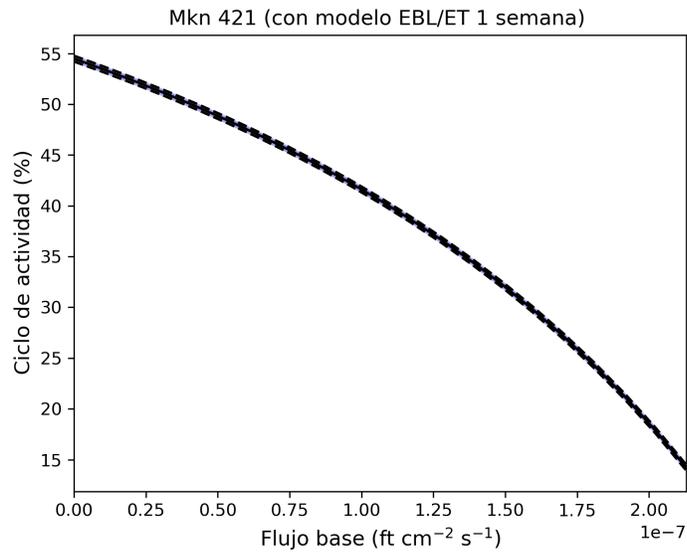


Figura 3.12. Ciclo de actividad del Blazar Mkn421 siguiendo el procedimiento presentado por Tluczykont et al. [2007]. El flujo base varía desde ~ 0.5 hasta 2.2×10^{-7} fotones $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. El área en color azul representa los errores asociados al DC de la ecuación 3.6, tomando en cuenta el error en \bar{f} [Patricelli et al., 2014].

cuenta ([Taylor, 2014], [Patricelli et al., 2014]).

A modo de ilustración, se muestra en la figura 3.12 el ciclo de actividad de Mkn 421 para datos de 10 años observados por la misión por Fermi y en la figura 3.13 la curva de luz de Mkn 421 mostrando el límite superior del flujo base.

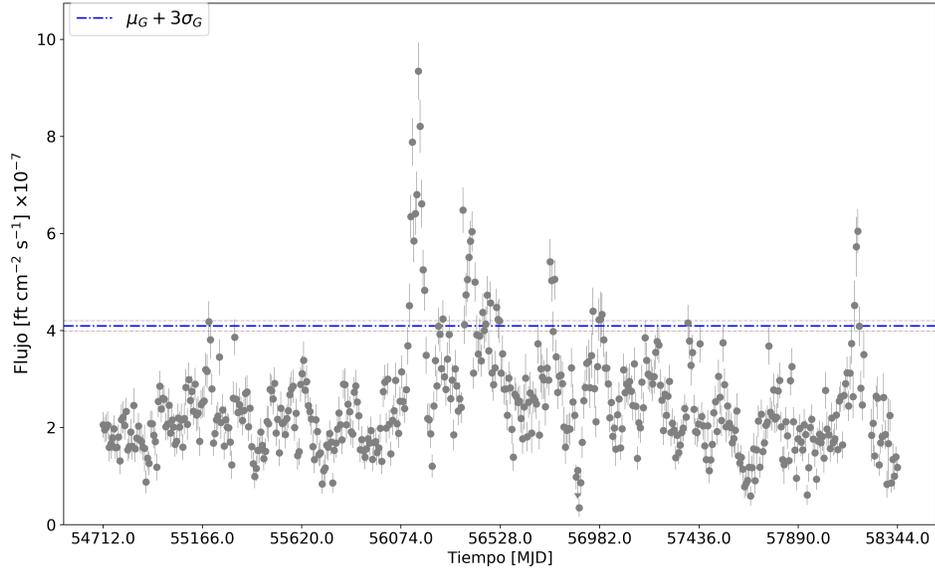


Figura 3.13. Curva de luz de Mkn 421 con episodios temporales de una semana. La línea horizontal azul indica el umbral de actividad usado en el criterio Tluczykont et al. [2007], con un valor de $\mu_G + 3\sigma_G = 4.09 \pm 0.11 \times 10^{-7} \text{ ft cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3.5.4. Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]

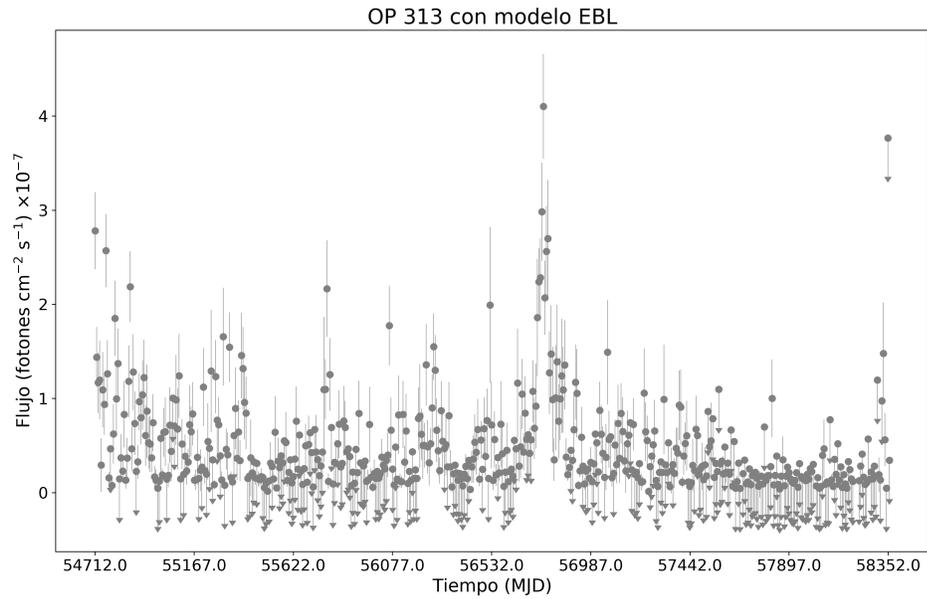
Este criterio combina la metodología para inferir el ciclo de actividad utilizada por Vercellone et al. [2004] considerando considerando como flujo base y umbral lo propuesto por Tluczykont et al. [2007]. Entonces, se considera una fase activa cuando, (1) el flujo es mayor al criterio $\mu_G + 3\sigma_G$ y (2) cuando el valor de (flujo $-\Delta$ flujo) es mayor que μ_G .

3.6. Distribución espectral de energías

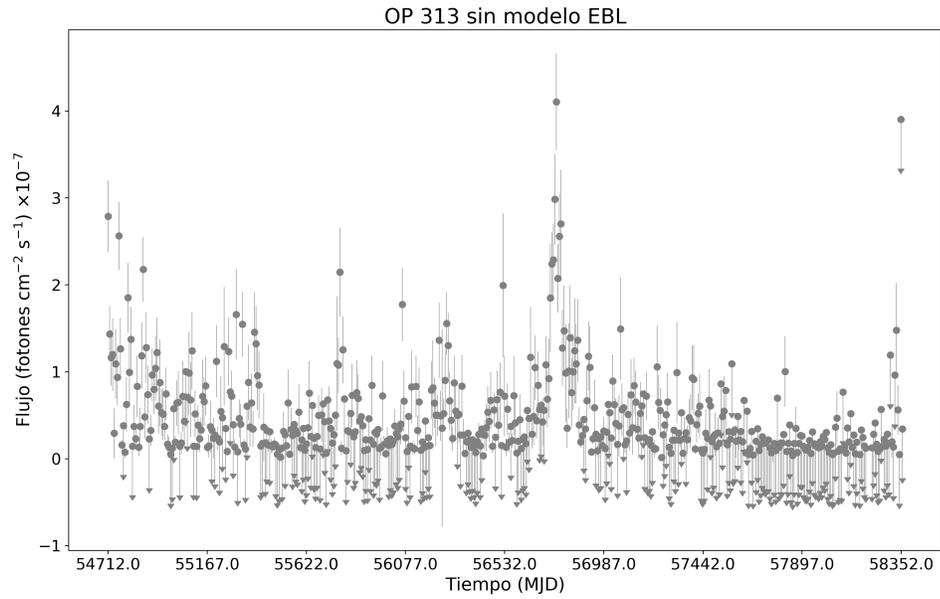
Como se mencionó en la sección 1.3 del capítulo 1, los fotones de rayos gamma tienden a atenuarse por medio de interacciones fotón-fotón con fotones de menor energía de la luz de fondo extragaláctico (EBL) produciendo un par de partículas ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$). Esta atenuación es significativa para fuentes ubicadas a $z > 1$ emitiendo a energías $> 10\text{GeV}$.

El modelo de EBL utilizado en este trabajo fue el de Franceschini et al. [2008]. Este modelo sustrae de los datos la contribución EBL. Dado a que las fuentes de la muestra: Mkn 421, TXS 0506+056, OP 313 y 3C 279 tienen corrimientos al rojo de 0.031, 0.337, 0.997 y 0.538, respectivamente, no se espera un cambio notorio en el flujo, la variabilidad de este y en el ciclo de actividad de las fuentes, estos resultados deben ser constantes bajo cualquier modelo de EBL aplicado o sin aplicar modelo alguno.

En la figura se muestra la curva de luz del objeto más lejano de la muestra, OP 313 con el modelo EBL de [Franceschini et al., 2008] aplicado en el gráfico superior y en el inferior sin modelo de contribución de EBL.



(a)



(b)

Figura 3.14. En la figura (a) se muestra la curva de luz de OP 313 con episodios temporales de una semana aplicado el modelo de EBL de Franceschini et al. [2008]. En la figura (b) se muestra la curva de luz sin contribución de EBL.

4. Resultados y discusión de resultados

4.1. Mkn421

Markarian 421 es uno de los blazares más cercanos a la Tierra con corrimiento al rojo de $z=0.031$ y uno de los más brillantes del cielo en rayos gamma. En este trabajo se estudió en un intervalo de tiempo de 10 años de observación (entre el 01 de septiembre del 2008 al 01 de septiembre del 2018) en un rango de energía de 100 MeV a 300 GeV con el instrumento Fermi LAT. La reconstrucción de datos se obtuvo utilizando una ley de potencias para el SED de la fuente con corrección EBL usando el modelo de Franceschini et al. [2008] y sin una corrección de EBL.

Para el cálculo del ciclo de actividad (DC) se usaron los 4 criterios descritos en la sección 3.5 del capítulo 3: el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004], el criterio de zonas inactivas, el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007] y el último criterio combinando los criterios de Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007] con 4 episodios temporales diferentes. Utilizando episodios temporales de 3 meses se obtienen 44 puntos en la curva de luz, utilizando episodios de 1 mes se obtiene una curva de luz con 131 puntos, para 2 semanas se tienen 261 y para 1 semana consta de 522 puntos de flujo en la curva de luz.

4.1.1. Criterio propuesto por Vercellone et al. [2004].

En la tabla 4.1 se muestran los resultados del ciclo de actividad inferido utilizando el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar Mkn 421. La parte superior de la tabla muestra el flujo base ($\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$), el umbral ($1.5\bar{f}$) y el valor del ciclo de actividad (DC) tomando en cuenta la contribución de EBL en la reconstrucción de la curva de luz usando el modelo de Franceschini et al. [2008] para episodios temporales de 3 meses, 1 mes, 2 semanas y 1 semana. La parte inferior de la tabla muestra los valores inferidos sin considerar la contribución de EBL en la reconstrucción de la curva de luz. Los errores en las mediciones se obtienen mediante propagación de errores (ver sección 3.5.3 del capítulo 3).

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC±ΔDC (%)
3 meses	2.54±0.14	3.81×10 ⁻⁷	5.00±0.06
1 mes	2.49±0.09	3.74×10 ⁻⁷	7.75±0.03
2 semanas	2.51±0.07	3.77×10 ⁻⁷	6.56±0.01
1 semana	2.47±0.05	3.71×10 ⁻⁷	7.34±0.01
Promedio	2.50±0.09	3.77×10 ⁻⁷	6.66±0.03
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC±ΔDC (%)
3 meses	2.50±0.13	3.75×10 ⁻⁷	7.14±0.09
1 mes	2.49 ± 0.09	3.74×10 ⁻⁷	7.75±0.03
2 semanas	2.51 ± 0.07	3.76 ×10 ⁻⁷	6.56 ± 0.01
1 semana	2.47 ± 0.05	3.71×10 ⁻⁷	7.34±0.01
Promedio	2.49 ± 0.09	3.74 ×10 ⁻⁷	7.20±0.04

Tabla 4.1. Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar Mkn 421. La parte superior de la tabla muestra resultados obtenidos considerando la contribución de EBL y la parte inferior muestra los resultados sin contribución EBL. Los errores en el valor del umbral ($1.5\bar{f}$) son los mismos que los errores del flujo base.

4.1.2. Criterio de zonas inactivas

Como se detalla en la sección 3.5.2 del capítulo 3, este criterio consiste en tomar como flujo base el flujo promedio (\bar{f}_b) de los puntos que se encuentran debajo del flujo promedio total (\bar{f}) de la fuente, para reducir la contribución de las fases activas en la estimación del flujo base. El criterio de actividad es el mismo para el criterio usado por Vercellone.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados inferidos para el ciclo de actividad utilizando el criterio de zonas inactivas. La primera columna muestra los datos del flujo base \bar{f}_b , la segunda el umbral ($1.5\bar{f}_b$) y la tercera el ciclo de actividad DC para cuatro episodios temporales con y sin contribución de EBL en la reconstrucción de las curvas de luz.

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f}_b \pm \Delta\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$1.5\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	2.08 \pm 0.06	3.12×10^{-7}	15.00 \pm 0.19
1 mes	1.89 \pm 0.04	2.84×10^{-7}	19.38 \pm 0.08
2 semanas	1.89 \pm 0.03	2.84×10^{-7}	19.31 \pm 0.04
1 semana	1.80 \pm 0.02	2.70×10^{-7}	19.88 \pm 0.02
Promedio	1.92 \pm 0.04	2.90×10^{-7}	18.39 \pm 0.08
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$f_b \pm \Delta f_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$1.5f_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	2.03 \pm 0.06	3.03×10^{-7}	16.67 \pm 0.20
1 mes	1.89 \pm 0.04	2.84×10^{-7}	19.38 \pm 0.08
2 semanas	1.89 \pm 0.03	3.24×10^{-7}	18.92 \pm 0.04
1 semana	1.80 \pm 0.02	2.71×10^{-7}	20.46 \pm 0.02
Promedio	1.90 \pm 0.04	2.96×10^{-7}	18.86 \pm 0.09

Tabla 4.2. En la parte superior de la tabla se muestran los resultados del ciclo de actividad para el criterio de zonas inactivas del blazar Mkn 421 con contribución EBL y en la parte inferior de la tabla se muestran los resultados sin contribución EBL. El error del umbral ($1.5\bar{f}_b$) es el mismo que para el flujo base (\bar{f}_b).

4.1.3. Criterio de Tluczykont et al. [2007]

Para inferir el flujo base en este criterio se realiza el ajuste de la suma de dos funciones (Gauss + Lognormal) a la distribución de flujos de la fuente. La función Gaussiana representa los puntos de flujo en estado inactivo y la función lognormal representa los puntos de flujo activo. Se presenta el histograma de la distribución de frecuencia de flujos para la fuente Mkn 421 en la figura 4.1.

Los datos que se muestran en la esquina superior derecha del gráfico del histograma son el número de entradas, la media de los datos y la desviación estándar de los datos. Los parámetros de la derecha son los de las funciones de ajuste, con subíndice ln para los parámetros log normal y con subíndice G para los parámetros de la función gaussiana.

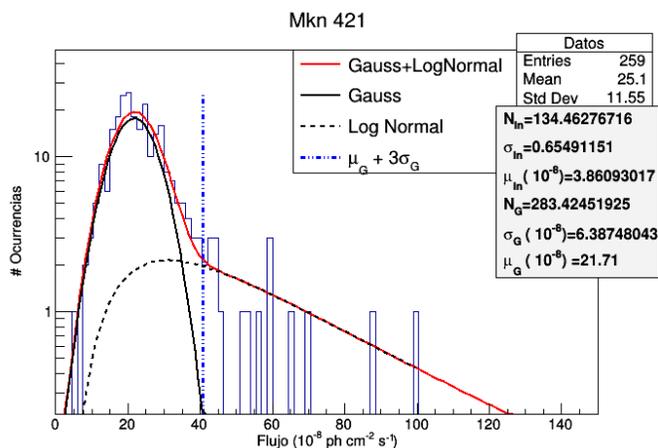


Figura 4.1. Histograma de frecuencias de flujos del blazar Mkn 421 con episodio temporal de 2 semanas. El ajuste de la función gaussiana se muestra con la línea negra continua, la línea negra punteada es el ajuste log normal y la roja continua es el ajuste con la suma de ambas funciones. La línea azul representa el umbral para este criterio ($\mu_G + 3\sigma_G$). Los demás histogramas considerando los diferentes episodios temporales utilizados en este estudio se encuentran en el apéndice A.

En la figura 4.2 se muestra el ciclo de actividad de Mkn 421 con corrección EBL utilizando el modelo de Franceschini et al. [2008] y usando el criterio presentado por Tluczykont et al. [2007]. El ciclo de actividad varía en función del rango de flujo base cuyo límite inferior es cero y límite máximo es la media gaussiana.

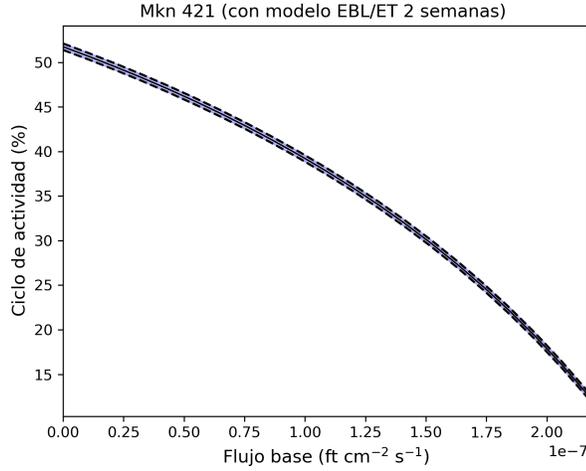


Figura 4.2. El ciclo de actividad de Mkn 421 con episodio temporal de 2 semanas con contribución EBL en función del rango del flujo base $[0, \mu_G]$, los errores del ciclo de actividad se obtienen mediante el error del flujo promedio (ver sección 3.5.3, cap. 3). Las demás gráficas del ciclo de actividad considerando diferentes tamaños de episodio se encuentran en el apéndice A.

Se muestra en la tabla 4.3 los resultados de Mkn 421 utilizando diferentes episodios temporales con el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007] con contribución de EBL y sin contribución EBL. Se muestra el extremo superior del flujo base (μ_G), el umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$), el ciclo de actividad promedio (\bar{DC}) y el ciclo de actividad evaluado en el extremo inferior del flujo base considerado para flujo base igual a cero (DC_0) y en el extremo superior del flujo base (DC_μ), todos los datos con sus respectivos errores (ver sección 3.5.3 del capítulo 3).

Con modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	2.20 \pm 0.20	3.77 \pm 0.67	39.19 \pm 0.72	55.82 \pm 0.72	13.80 \pm 0.72
1 mes	2.09 \pm 0.11	3.59 \pm 0.23	43.68 \pm 0.66	59.56 \pm 0.66	19.02 \pm 0.66
2 semanas	2.17 \pm 0.08	4.09 \pm 0.16	35.83 \pm 0.36	51.76 \pm 0.36	12.65 \pm 0.36
1 semana	2.13 \pm 0.06	4.09 \pm 0.11	38.34 \pm 0.28	54.49 \pm 0.28	14.21 \pm 0.28
Promedio	2.15 \pm 0.11	3.89 \pm 0.30	39.26 \pm 0.51	55.41 \pm 0.51	14.92 \pm 0.51
Sin modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	2.15 \pm 0.13	3.15 \pm 0.28	50.46 \pm 1.13	67.16 \pm 1.13	21.47 \pm 1.13
1 mes	2.09 \pm 0.12	3.64 \pm 0.25	42.25 \pm 0.62	58.11 \pm 0.62	17.98 \pm 0.62
2 semanas	2.15 \pm 0.07	4.06 \pm 0.13	34.78 \pm 0.36	50.27 \pm 0.36	12.64 \pm 0.36
1 semana	2.10 \pm 0.09	3.97 \pm 0.14	40.96 \pm 0.33	56.97 \pm 0.33	16.63 \pm 0.33
Promedio	2.12 \pm 0.10	3.71 \pm 0.20	42.11 \pm 0.61	58.13 \pm 0.61	17.18 \pm 0.61

Tabla 4.3. Tabla de datos del blazar Mkn 421 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$), del ciclo de actividad promedio (\bar{DC}), del ciclo de actividad en los extremos mínimo (DC_0) y máximo (DC_μ) con contribución EBL y en la parte inferior están los datos sin la contribución EBL.

4.1.4. Criterio combinación de Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007]

Se muestra en la tabla 4.4 los resultados de Mkn 421 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007] con contribución de EBL y sin contribución EBL. La combinación consiste en el uso del umbral propuesto por Tluczykont et al. [2007] con la definición de fase activa propuesto por Vercellone et al. [2004], es decir se toma como activo puntos que no sean límites superiores, puntos con flujo mayor al umbral y que el error inferior de flujo no cruce el umbral.

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$DC \pm \Delta DC$ (%)
3 meses	2.20 \pm 0.20	3.77 \pm 0.67	7.32 \pm 0.09
1 mes	2.09 \pm 0.11	3.59 \pm 0.23	9.23 \pm 0.04
2 semanas	2.17 \pm 0.08	4.09 \pm 0.16	5.00 \pm 0.01
1 semana	2.13 \pm 0.06	4.09 \pm 0.11	4.62 \pm 0.01
Promedio	2.15 \pm 0.11	3.89 \pm 0.30	6.54 \pm 0.04
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$DC \pm \Delta DC$ (%)
3 meses	2.15 \pm 0.13	3.15 \pm 0.28	16.27 \pm 0.19
1 mes	2.09 \pm 0.12	3.64 \pm 0.25	9.23 \pm 0.04
2 semanas	2.15 \pm 0.07	4.06 \pm 0.13	5.00 \pm 0.01
1 semana	2.10 \pm 0.09	3.97 \pm 0.14	5.39 \pm 0.06
Promedio	2.12 \pm 0.10	3.71 \pm 0.20	8.97 \pm 0.08

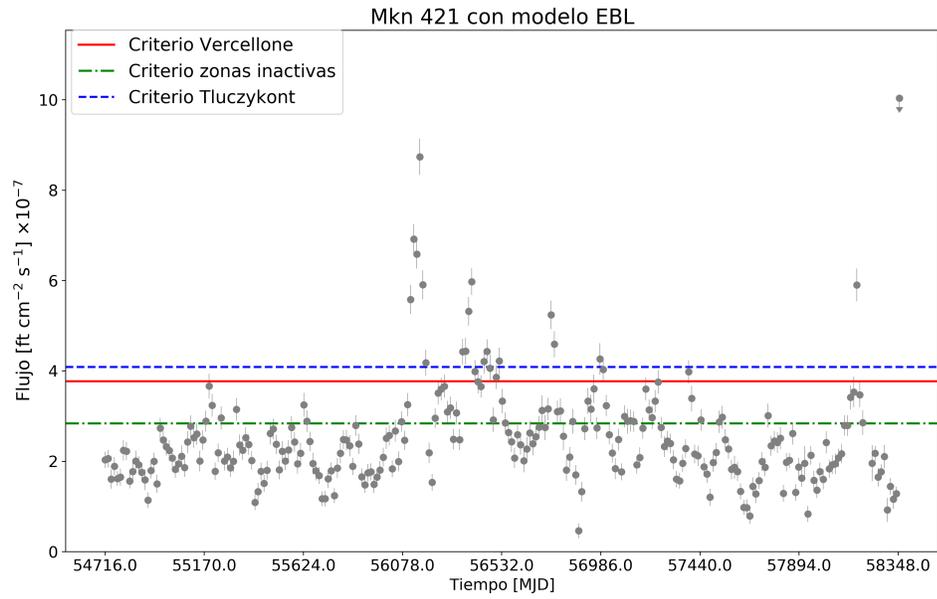
Tabla 4.4. Tabla de datos del blazar Mkn 421 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$) del criterio propuesto por Tluczykont, y del ciclo de actividad (DC) con EBL. En la parte inferior se muestran los datos sin EBL.

4.1.5. Tabla resumen Mkn 421

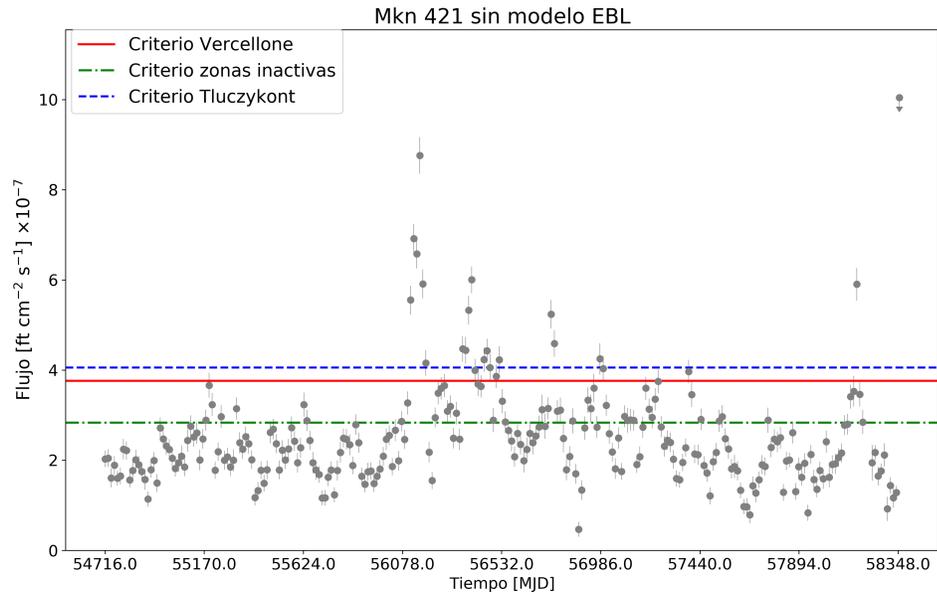
En la siguiente tabla se presenta una recopilación de datos del blazar Mkn 421 con episodio temporal de dos semanas para los cuatro criterios usados de ciclo de actividad. En la parte superior de la tabla están los datos con contribución EBL usando el modelo de Franceschini et al. [2008] y en la parte inferior de la tabla se presentan los datos sin una contribución EBL.

Con modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
Vercellone	2.51±0.07	3.76±0.07	6.56±0.01
Zonas inactivas	1.89±0.03	3.24±0.03	18.92±0.04
Thuczykont	2.17±0.08	4.09±0.16	35.83±0.61
Verc.+Thuczy.	2.17±0.08	4.09±0.16	5.00±0.01
Promedio	2.10±0.07	3.80±0.11	16.58±0.17
Sin modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
Vercellone	2.51±0.07	3.76±0.07	6.56±0.01
Zonas inactivas	1.89±0.03	3.24±0.03	18.92±0.04
Thuczykont	2.15±0.07	4.06±0.13	34.78±0.54
Verc.+Thuczy.	2.15±0.07	4.06±0.13	5.00±0.01
Promedio	2.18±0.06	3.78±0.09	16.32±0.15

Tabla 4.5. Tabla de datos recopilados del blazar Mkn 421 para episodios temporales de dos semanas con los cuatro criterios usados. En la parte superior de la tabla están los datos con contribución EBL y en la parte inferior se muestran los datos sin contribución de EBL.

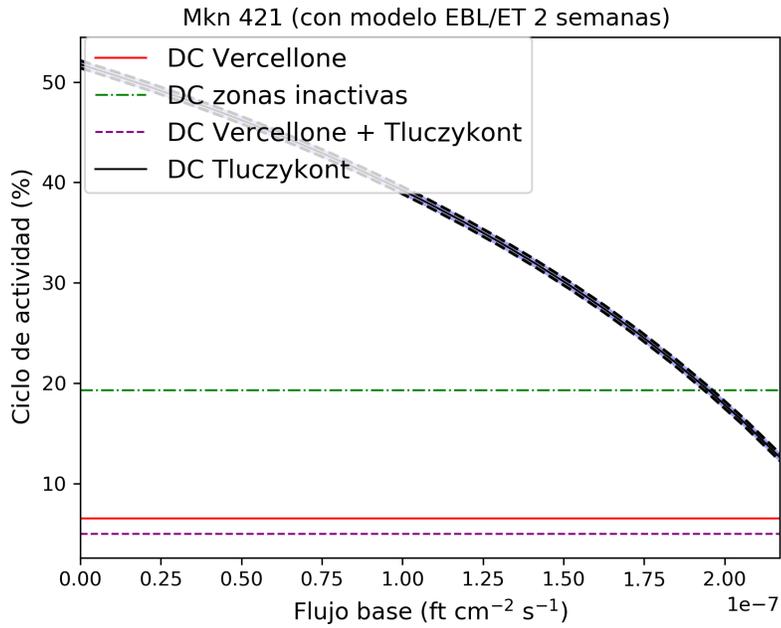


(a)

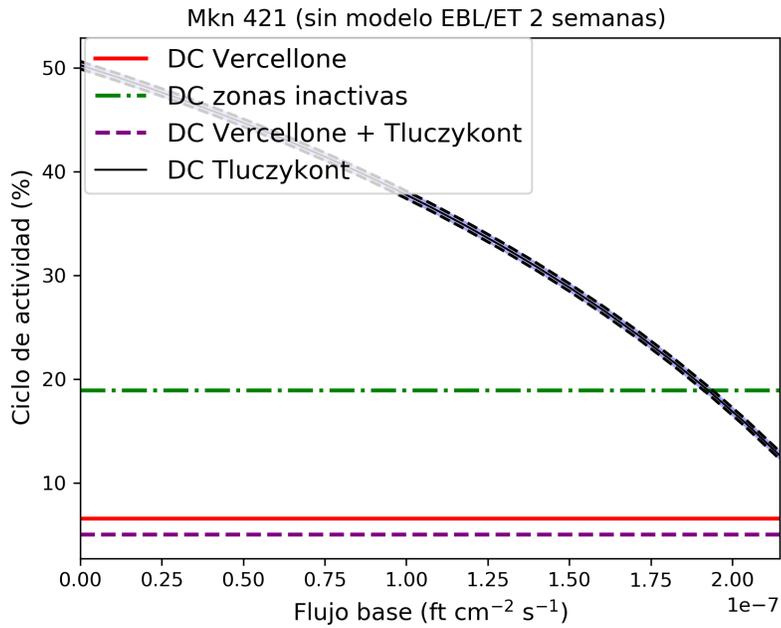


(b)

Figura 4.3. Curvas de luz de Mkn 421 con episodios temporales de 2 semanas. La curva de luz en (a) se muestra con contribución EBL, la curva de luz en (b) se muestra sin contribución de EBL. Las líneas horizontales pertenecen a los tres umbrales de actividad; la línea roja continua es el umbral del criterio propuesto por Vercellone para esta fuente, la línea verde no continúa es el umbral de zonas inactivas y la línea azul es el umbral de actividad propuesto por Tluczykont.



(a)



(b)

Figura 4.4. Gráfico del ciclo de actividad del blazar Mkn 421 con los 4 criterios de ciclo de actividad usados para episodios temporales de 2 semanas. El gráfico (a) muestra los ciclos de actividad con contribución EBL y el gráfico (b) muestra los ciclos de actividad sin contribución EBL.

Se presenta la distribución espectral de energías (SED) de Mkn 421 ajustada a una función ley de Potencias. Se observa que la SED con corrección EBL y sin corrección EBL se sobreponen.

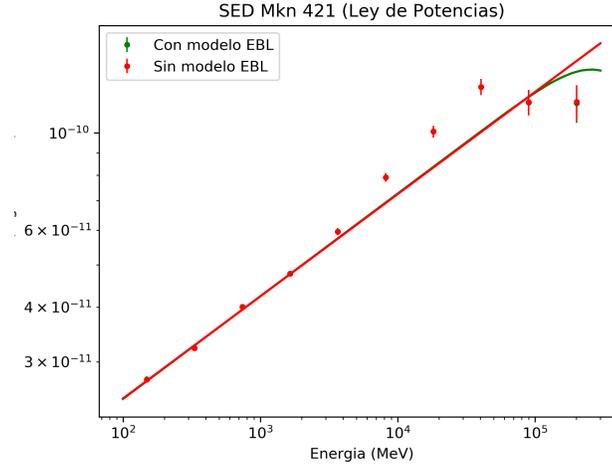


Figura 4.5. Distribución espectral de energías (SED) de Mkn 421 con contribución del modelo EBL (curva verde) y sin contribución de modelo EBL (curva roja).

4.2. TXS 0506+056

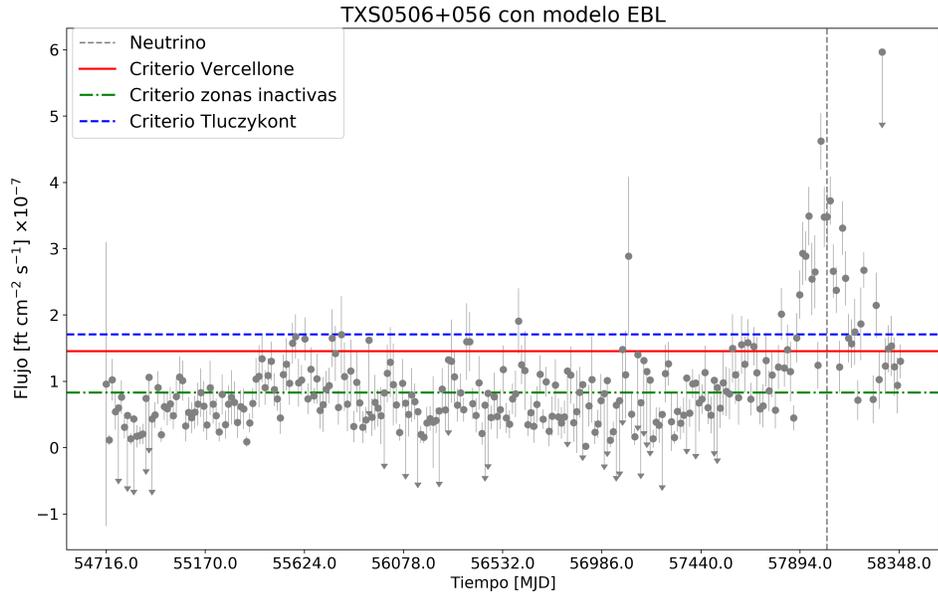
Se presentan los resultados del blazar BL Lac TXS 0506+056 estudiado entre el 01 de septiembre del 2008 al 01 de septiembre del 2018 en un rango de energía de 100MeV a 300GeV. Esta es la primera fuente detectada en un estado activo en coincidencia espacial y temporal con el evento de neutrino 170922A visto por IceCube [IceCube Collaboration et al., 2018]. La reconstrucción de datos se obtuvo utilizando una ley de potencias para el SED de la fuente con la corrección EBL del modelo Franceschini et al. [2008] y sin corrección de EBL. Se obtuvo el ciclo de actividad utilizando los 4 criterios descritos en la sección 3.5 del capítulo 3.

La siguiente tabla muestra los resultados del flujo base, del umbral y del ciclo de actividad de los 4 criterios usados, para un episodio temporal de 2 semanas. Las demás tablas, gráficos de histogramas y de ciclos de actividad se encuentran en la sección de anexos.

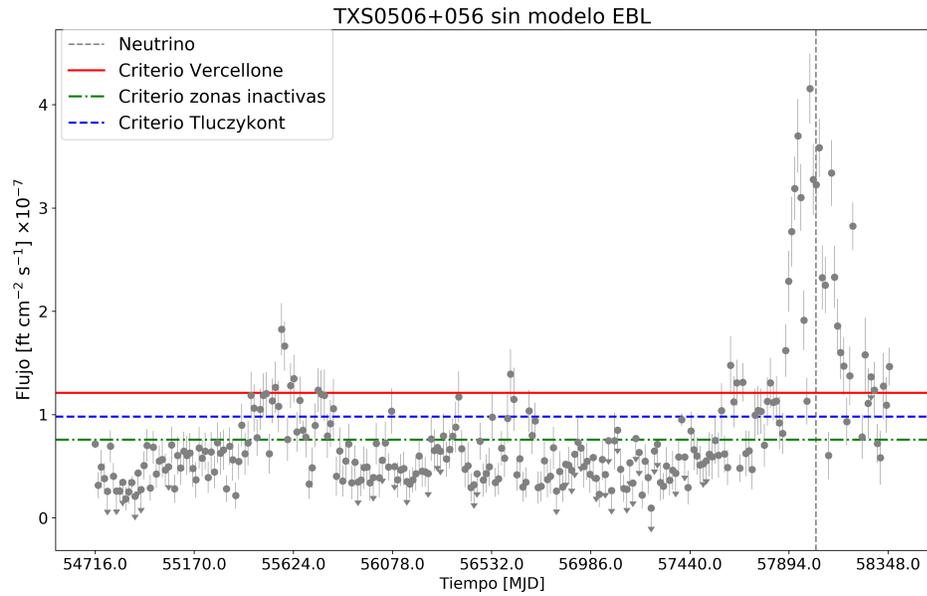
4.2.1. Tabla resumen TXS 0506+056

Con modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	DC±ΔDC (%)
Vercellone	9.69±0.47	14.50±0.47	6.95±0.01
Zonas inactivas	5.53±0.18	8.30±0.18	19.31±0.04
Tluczykont	7.37±0.59	17.10±1.01	25.40±1.12
Verc.+Tluczy.	7.37±0.59	17.10±1.01	5.77±0.01
Promedio	7.49±0.46	14.25±0.67	14.36±0.30
Sin modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	DC±ΔDC (%)
Vercellone	8.07±0.40	12.10±0.40	8.11±0.02
Zonas inactivas	5.05±0.12	7.58±0.12	23.55±0.05
Tluczykont	5.08±0.29	9.63±0.46	51.57±2.74
Verc.+Tluczy.	5.18±0.29	9.79±0.46	13.08±0.03
Promedio	5.85±0.28	9.78±0.36	24.08±0.71

Tabla 4.6. Resultados de los 4 criterios de ciclo de actividad para TXS 0506+056 con episodio temporal de 2 semanas. La parte superior de la tabla tiene los datos del flujo base, del umbral, y del ciclo de actividad para cada criterio con corrección EBL, la parte inferior muestra los resultados sin corrección EBL.



(a)



(b)

Figura 4.6. Curva de luz del blazar TXS0506+056 con los umbrales de actividad usados. La línea roja continua es el umbral propuesto por Vercellone, la línea azul es el umbral propuesto por Tluczykont y la línea verde es el umbral del criterio de zonas inactivas. La figura superior (a) muestra la curva de luz con contribución EBL y la curva (b) muestra sin contribución EBL. La línea vertical gris no continua representa el tiempo en el que se detectó el evento de neutrino.

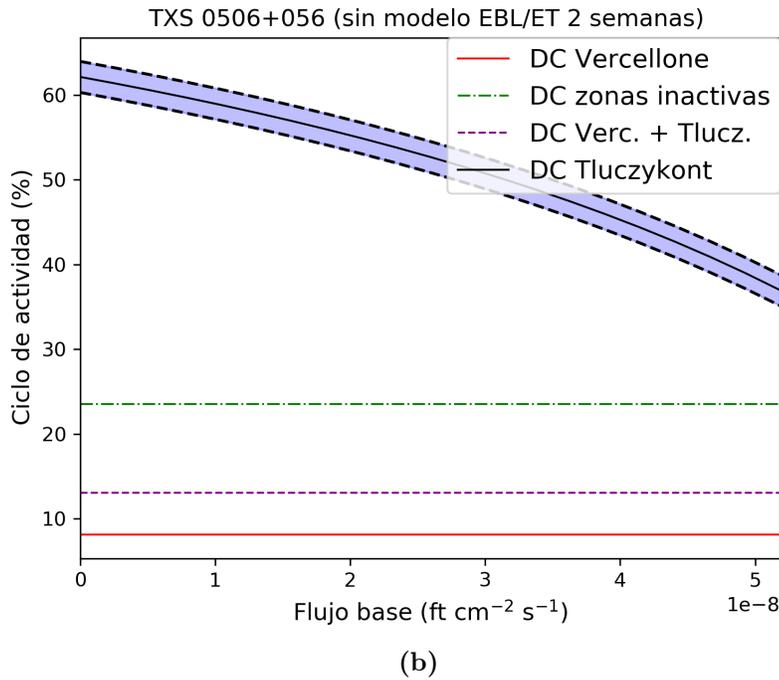
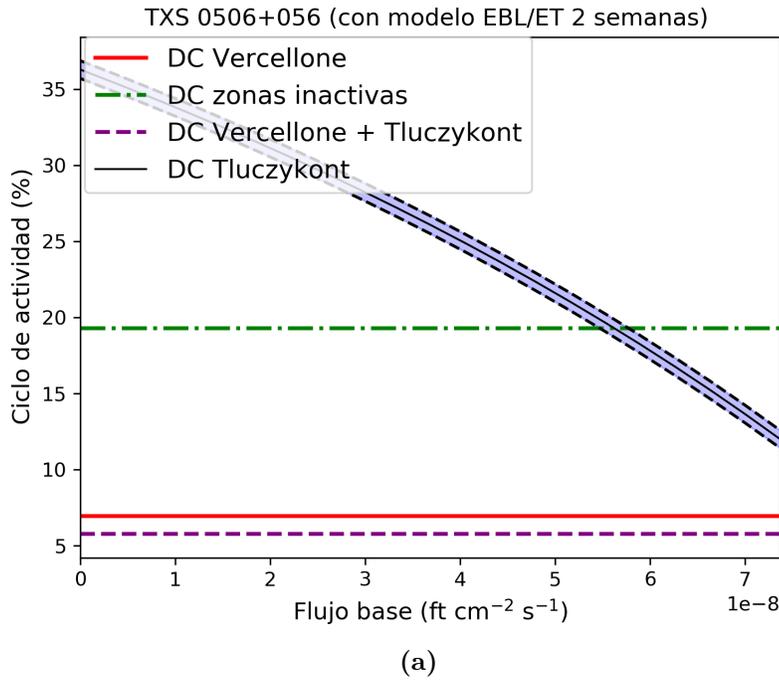


Figura 4.7. Ciclo de actividad del blazar TXS 0506+056 con los cuatro criterios usados. La línea roja es el ciclo de actividad del criterio usado por Vercellone, la línea púrpura es el ciclo de actividad usado en el criterio combinando Vercellone y Tluczykont y la línea verde es el ciclo de actividad del criterio de zonas inactivas. La curva azul es el ciclo de actividad en función del rango de flujo base utilizado por Tluczykont. En el gráfico (a) se muestra el ciclo de actividad con contribución EBL y en el gráfico (b) sin contribución EBL.

Se presenta la distribución espectral de energías (SED) del blazar TXS0506+056 ajustada a una función ley de Potencias. Se observa que la SED con corrección EBL y sin corrección EBL se sobreponen.

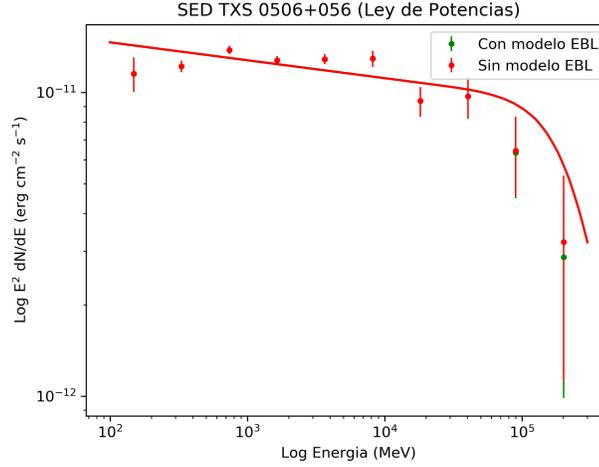


Figura 4.8. Distribución espectral de energías (SED) de TXS 0506+056 con contribución del modelo EBL de Franceschini (curva verde) y sin contribución del modelo EBL de Franceschini (curva roja). Ambas curvas se sobreponen.

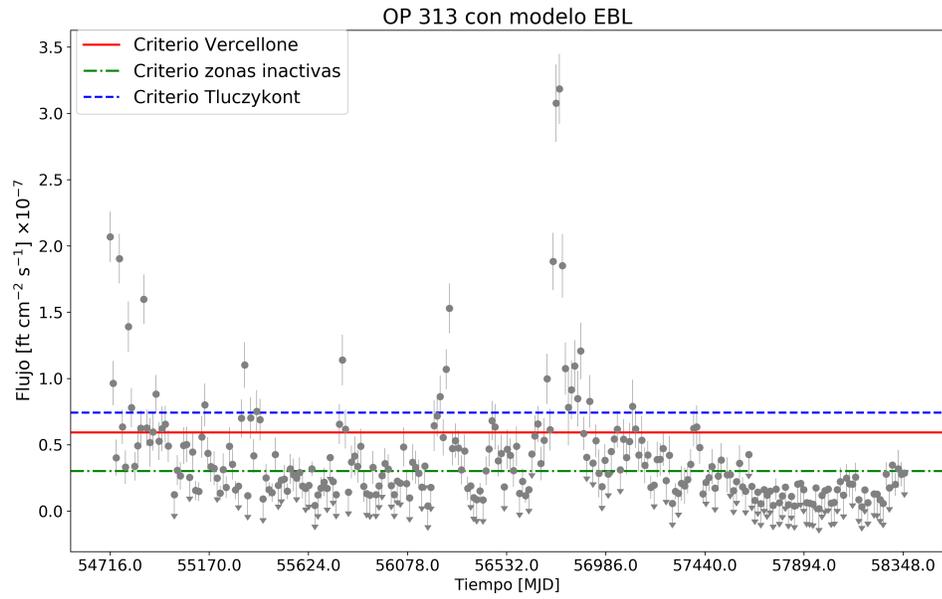
4.3. OP 313

Se presentan los resultados de OP 313 observado por Fermi LAT por 10 años, desde el 01 de septiembre del 2008 hasta el 01 de septiembre del 2018 en un rango de energía de 100 MeV a 300 GeV. OP 313 presentó una coincidencia espacial mas no una temporal con un evento de neutrino astofísico pues la fuente no presenta un incremento de actividad en rayos gamma en el tiempo de detección del neutrino [Aartsen et al., 2016]. El blazar OP 313 es de tipo espectral FSRQ, la reconstrucción de datos se obtuvo utilizando una función log parábola para el SED con contribución EBL usando el modelo Franceschini et al. [2008] y sin contribución EBL. Para el cálculo del ciclo de actividad se usaron los 4 criterios descritos en la sección 3.5 del capítulo 3. Se presenta a continuación datos recopilados de los 4 criterios para episodio temporal de 2 semanas, las demás datos se encuentran en la sección de anexos.

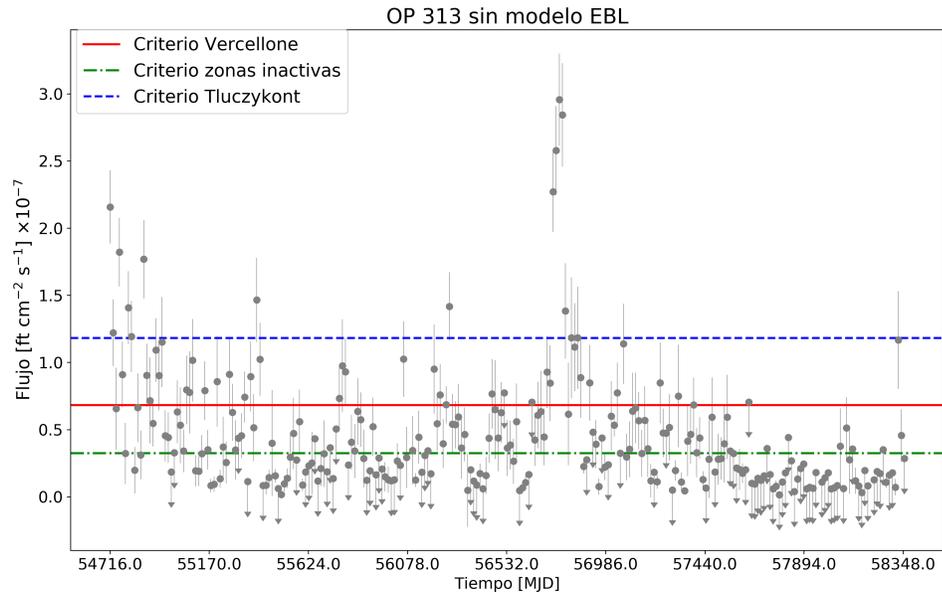
4.3.1. Tabla resumen OP 313

Con modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	DC $\pm\Delta$ DC (%)
Vercellone	3.94 \pm 0.25	5.92 \pm 0.25	8.88 \pm 0.02
Zona inactiva	2.00 \pm 0.07	3.01 \pm 0.07	29.73 \pm 0.06
Tluczykont	2.79 \pm 0.69	7.41 \pm 1.08	26.74 \pm 3.81
Verc.+Tluczy.	2.79 \pm 0.69	7.41 \pm 1.08	6.54 \pm 0.01
Promedio	2.88 \pm 0.43	5.94 \pm 0.62	71.89 \pm 0.96
Sin modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	DC $\pm\Delta$ DC (%)
Vercellone	4.55 \pm 0.28	6.82 \pm 0.28	8.85 \pm 0.02
Zona inactiva	2.16 \pm 0.09	3.24 \pm 0.09	25.77 \pm 0.05
Tluczykont	4.43 \pm 7.52	11.81 \pm 11.96	15.66 \pm 1.66
Verc.+Tluczy.	4.43 \pm 7.52	11.81 \pm 11.96	2.69 \pm 0.01
Promedio	3.89 \pm 3.85	8.42 \pm 6.07	13.24 \pm 0.44

Tabla 4.7. Tabla de datos de OP 313 con episodio temporal de 2 semanas. Se muestra el flujo base, el umbral y el valor del ciclo de actividad para cada criterio con contribución de modelo EBL en la parte superior y sin contribución de modelo EBL en la inferior. El resultado del ciclo de actividad de Tluczykont es el valor promedio.

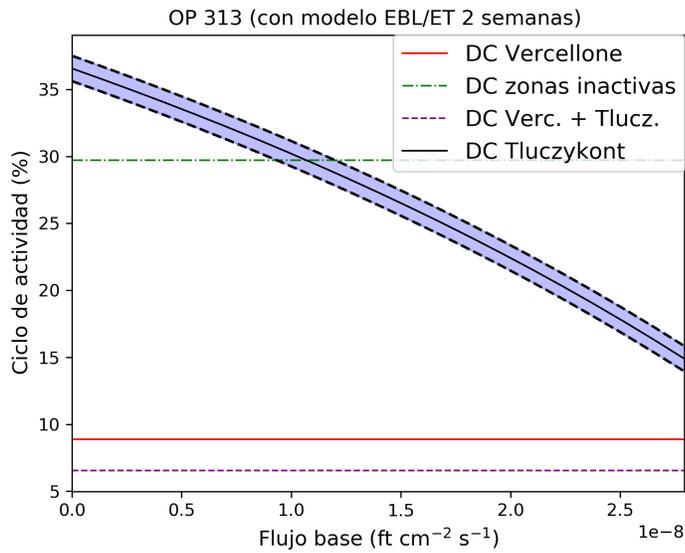


(a)

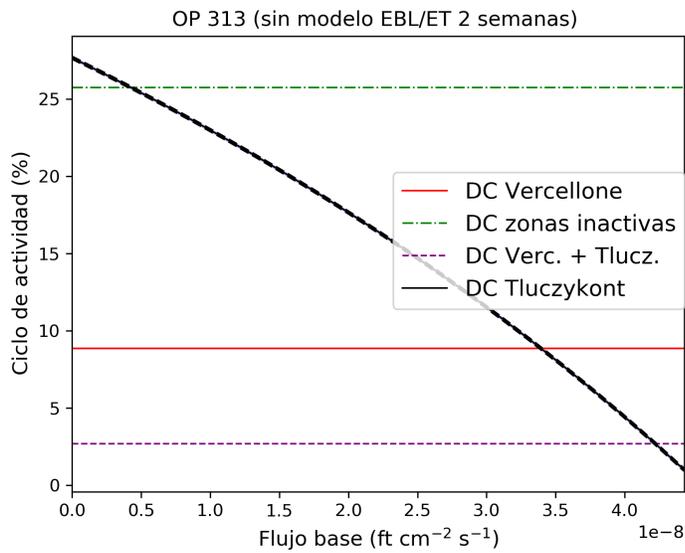


(b)

Figura 4.9. Curva de luz de OP 313 con episodio temporal de 2 semanas, la curva de luz (a) tiene contribución EBL, la curva de luz en (b) no tiene contribución EBL. La línea azul representa el umbral usado en Tluczykont, la línea roja continua es el umbral propuesto por Vercellone y la línea verde es el umbral del criterio de zonas inactivas.



(a)



(b)

Figura 4.10. Se muestra en el gráfico (a) el ciclo de actividad de OP 313 con los 4 criterios usados con una contribución EBL y sin contribución EBL en el gráfico (b). La curva azul es el ciclo de actividad del criterio Tluczkont, la línea roja continua es el ciclo de actividad usado por el criterio usado por Vercellone, la línea púrpura es el ciclo de actividad del criterio combinado de Vercellone y Tluczkont y la verde es el ciclo de actividad del criterio de zonas inactivas. El error del ciclo de actividad de Tluczkont se obtiene mediante el arrastre de errores del flujo promedio (\bar{f}) y del flujo base máximo (μ_G).

Se presenta la distribución espectral de energías (SED) del blazar OP 313 ajustada a una función log parabola.

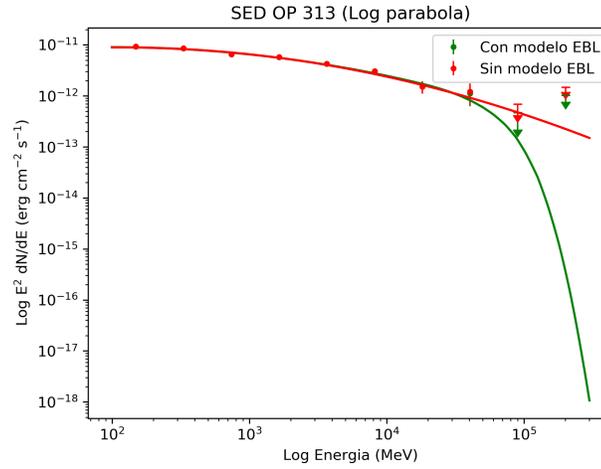


Figura 4.11. Distribución espectral de energías (SED) del blazar OP 313 con contribución del modelo EBL de Franceschini (curva verde) y sin contribución de modelo EBL (curva roja). Se observa mayor diferencia a energías mayores dado a que OP 313 se encuentra a un $z=0.997$.

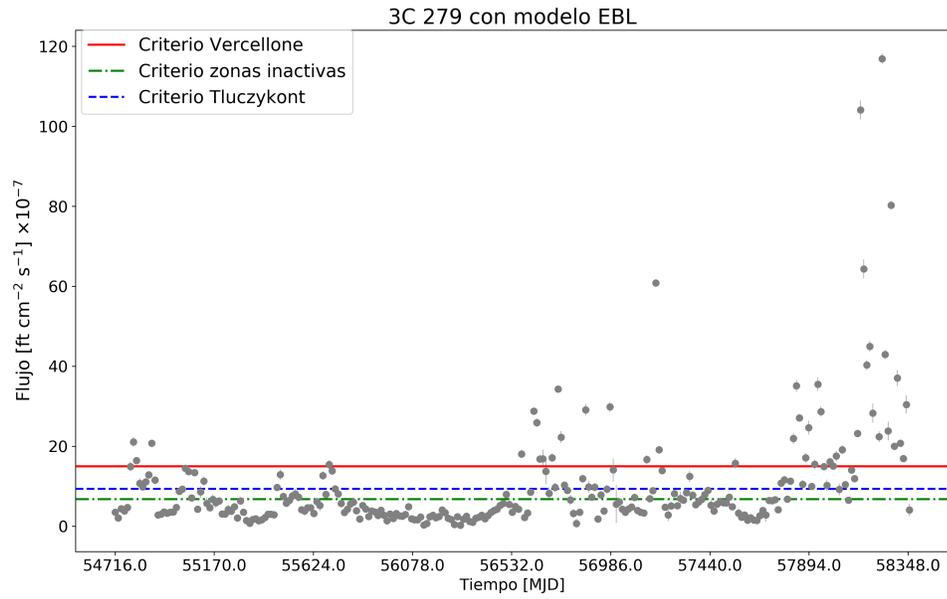
4.4. 3C 279

El blazar 3C 279 es conocido por tener fases de extrema actividad como se puede notar en la curva de luz de la figura 4.12. Fue observado por un periodo de 10 años, desde el 01 de septiembre del 2008 hasta el 01 de septiembre del 2018 en un rango de energía de 100MeV a 300GeV. Para la reconstrucción de datos se usó una función log parabola, característica de la mayoría de FSRQs, para el SED con corrección EBL usando el modelo de Franceschini et al. [2008] y sin corrección EBL. Para el cálculo del ciclo de actividad (DC) se usaron los 4 criterios descritos en la sección 3.5 del capítulo 3. Se muestran los datos correspondientes a episodio temporal de 2 semanas, los demás datos se encuentran en la sección de anexos.

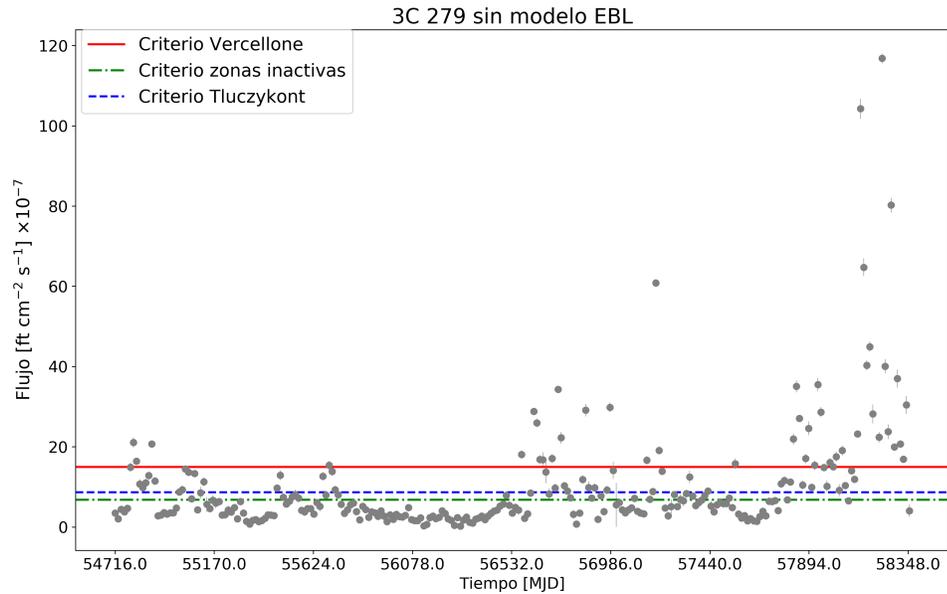
4.4.1. Tabla resumen 3C 279

Con modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
Vercellone	10.00±0.85	15.00±0.85	15.83±0.03
Zona inactiva	4.52±0.18	6.78±0.18	36.68±0.07
Tluczykont	3.36±0.69	9.34±1.21	60.38±12.25
Verc.+Tluczy.	3.36±0.69	9.34±1.21	30.38±0.08
Promedio	5.31±0.60	10.12±0.86	35.82±3.11
Sin modelo EBL			
Criterio	$F_b \pm \Delta F_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	Umbral (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
Vercellone	9.99±0.85	14.98±0.85	15.44±0.03
Zona inactiva	4.52±0.18	6.78±0.18	36.68±0.07
Tluczykont	3.47±0.79	8.63±1.72	63.34±14.09
Verc.+Tluczy.	3.47±0.79	8.63±1.72	33.46±0.08
Promedio	5.36±0.65	9.76±1.12	37.23±3.57

Tabla 4.8. Tabla de resultados del blazar 3C 279 con los 4 criterios usados para un episodio temporal de 2 semanas. Se muestra el flujo base, el umbral y el ciclo de actividad para cada criterio con contribución de modelo EBL para la parte superior y sin modelo EBL para la parte inferior.



(a)



(b)

Figura 4.12. Curva de luz del blazar 3C 279 con los umbrales de actividad usados. La curva de luz (a) se muestra con contribución EBL y la curva de luz en (b) sin contribución EBL. La línea roja continua es el umbral usado en Vercellone, la línea azul es el umbral de actividad propuesto por Tluczykont con sus errores respectivos y la línea verde es el umbral de zonas inactivas.

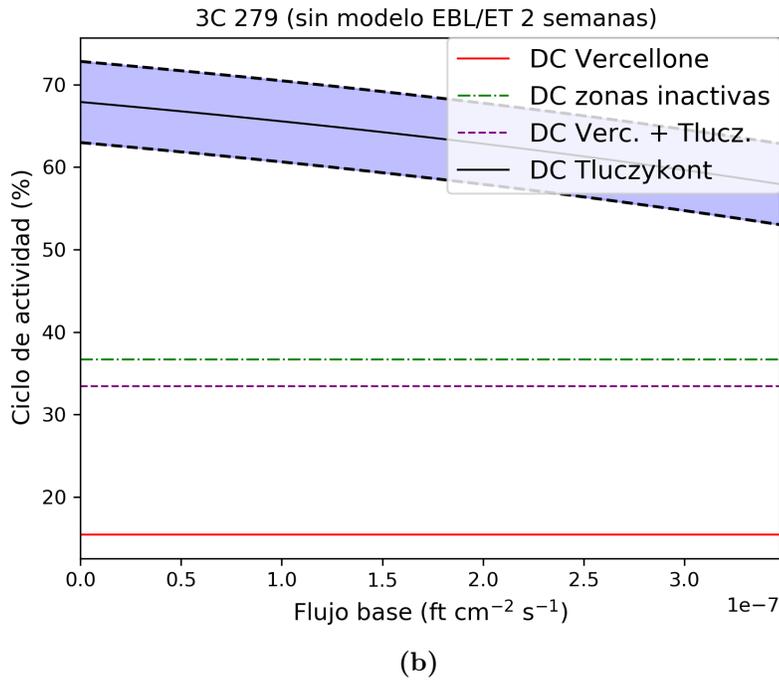
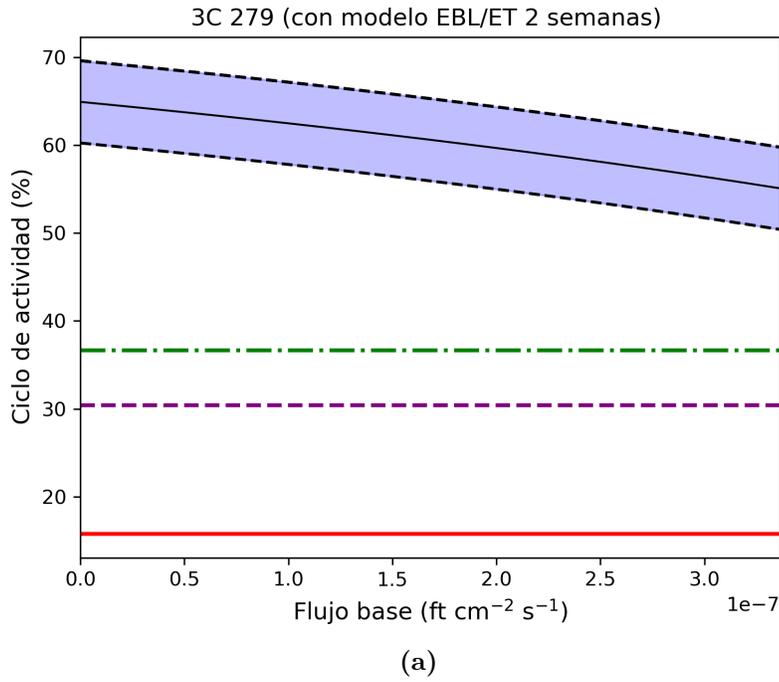


Figura 4.13. Ciclo de actividad del blazar 3C 279 con los 4 criterios usados. En el gráfico (a) se muestra el DC con corrección EBL, en el gráfico (b) sin corrección EBL. La curva azul es el ciclo de actividad propuesto por Tluczykont, la línea roja es el ciclo de actividad usado por Vercellone, la línea púrpura es el ciclo de actividad del criterio combinado de Vercellone + Tluczykont y la línea verde es ciclo de actividad correspondiente al criterio de zonas inactivas.

La distribución espectral de energías (SED) del blazar 3C 279 ajustada a una función log parabola. Se observa que la SED con corrección EBL y sin corrección EBL se sobreponen.

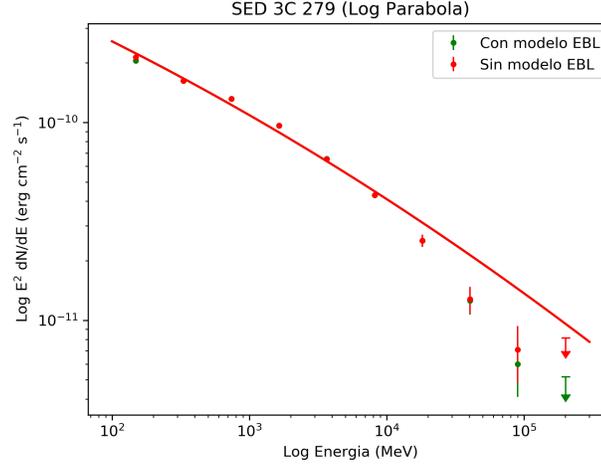


Figura 4.14. Distribución espectral de energías (SED) del blazar 3C 279 con contribución EBL (curva verde) y sin contribución EBL (curva roja).

4.5. Discusión

En este capítulo se presentaron los resultados del ciclo de actividad de los blazares Mkn 421, TXS 0506+056, OP 313 y 3C 279 observados por Fermi LAT en un intervalo de tiempo de 10 años, desde septiembre del 2008 hasta septiembre del 2018 (241920001-557452805 MET) y en un rango de energía de 100 MeV a 300GeV, con la corrección de la luz de fondo extragaláctico EBL del modelo Franceschini et al. [2008] y sin hacer la corrección con el modelo de EBL.

Los objetos de la muestra ya mencionada fueron elegidos por características especiales como por ejemplo: Mkn 421 por su cercanía y brillantez, TXS 0506+056 y OP 313 por tener coincidencia espacial y/o temporal con un evento de neutrino y 3C 279 por su alta variabilidad. La tabla 4.9 enlista las características de cada fuente de la muestra.

Fuente	z	Tipo de blazar	Tipo espectral	Pico sincrotrón	Coincidencia con neutrino
Mkn 421	0.031	BL Lac	Ley de potencias	HSP	No
TXS 0506+056	0.337	BL Lac	Ley de potencias	ISP	Sí
OP 313	0.997	FSRQ	Log parábola	LSP	Sí
3C 279	0.538	FSRQ	Log parábola	LSP	No

Tabla 4.9. Características de las fuentes de la muestra.

Se utilizaron cuatro criterios ya anteriormente descritos para obtener el ciclo de actividad de las fuentes. El criterio de Vercellone et al. [2004] propone el umbral de actividad de $1.5\bar{f}$, el promedio del flujo total (\bar{f}) toma en cuenta los puntos de flujo inactivos así como los activos por lo que muestra un umbral alto y por lo tanto, un ciclo de actividad bajo. El criterio de zonas inactivas usa como umbral de actividad $1.5\bar{f}_b$, siendo \bar{f}_b el flujo promedio solamente de los flujos que se encuentran debajo del flujo promedio, de esta forma se busca tomar menos puntos activos para inferir el flujo base, el ciclo de actividad para este criterio es más alto que con el criterio Vercellone. El tercer criterio es el propuesto por Tluczykont et al. [2007], en este se reescribe el ciclo de actividad de la ecuación 3.1, del capítulo 3, utilizando los valores de flujo promedio, el rango de flujo base y el flujo promedio activo obtenidos con el ajuste de las funciones gaussiana, para flujos en estado no activo y log normal para los flujos activos. Este criterio compara la diferencia entre el flujo promedio y el flujo base con la diferencia del flujo activo promedio y el flujo base como se ve en la ecuación 3.6, esperando que el ciclo de actividad sea (1) positivo, pues el flujo promedio (\bar{f}) y el flujo promedio activo ($\langle f_{picos} \rangle$) deben ser mayores al rango del flujo base ($F_b = [0, \mu_G]$) y (2) entre $[0,100]\%$ pues la diferencia $\langle f_{picos} \rangle - F_b$ es mayor a $\bar{f} - F_b$. El ciclo de actividad depende del valor de estas variables y dependiendo de la morfología del histograma de frecuencias de flujo, el ajuste infiere un umbral de actividad distinto para cada fuente. El último criterio es la combinación entre el criterio Vercellone y Tluczykont, se usa el umbral propuesto por Tluczykont ($\mu_G + 3\sigma_G$) que dependen de los valores del ajuste gaussiana + log normal, este umbral asegura no tomar en cuenta el 99.95% de los flujos contenidos en el ajuste de la función gaussiana que se asocia a los flujos inactivos. En comparación con el criterio usado por Tluczykont, aquí se obtiene un ciclo de actividad menor pues este criterio considera solamente intervalos temporales a diferencia de considerar los valores de flujo promedio como en el criterio de Tluczykont.

Para este trabajo se obtuvieron los ciclos de actividad para cada criterio con cuatro episodios temporales diferentes: 3 meses, 1 mes, 2 semanas y 1 semana. El episodio temporal significa que se acumulan y promedian datos de flujo en ese intervalo de tiempo por lo que se tiene un comportamiento de la fuente más detallado con episodios temporales de 1 y 2 semanas, y una idea general del comportamiento de la fuente con los episodios temporales de 1 y 3 meses.

El ciclo de actividad en los diferentes episodios temporales presenta cambios dependiendo la fuente. Mkn 421 no presenta un cambio significativo en ningún criterio, esto es porque Mkn 421 es un blazar cercano, brillante y con una curva de luz sin límites superiores de flujo y por lo tanto el nivel del flujo base para cada criterio de ciclo de actividad se mantiene constante. Este no es el caso de las demás fuentes de la muestra. El ciclo de actividad del blazar 3C 279 no presta un cambio significativo a diferentes episodios temporales para los criterios de Vercellone y de zonas inactivas, en cambio, para los criterios de Tluczykont y de Vercellone + Tluczykont, el umbral de actividad cambia considerablemente debido a que no se consiguió hacer un ajuste satisfactorio en los histograma de frecuencias de flujo. Por esta razón no se incluyen los resultados en episodios temporales de 3 meses y 1 mes con contribución del modelo EBL y en el episodio temporal de 1 mes sin la contribución del modelo EBL. Las otras dos fuentes de la muestra: TXS 0506+056 y OP 313 muestran una variación significativa en el ciclo de actividad con diferentes episodios temporales, esto se da pues sus curvas de luz presentan gran número de límites superiores. Sin embargo, el blazar OP 313 muestra una coincidencia entre el ciclo de actividad con episodios temporales de 3 meses con 1 mes y el de 2 semanas con 1 semana con el criterio de Vercellone, con el criterio de Tluczykont, en el episodio temporal de 3 meses con contribución del modelo EBL, no se consigue un ajuste adecuado por lo tanto no se incluye en los resultados. En general estas últimas dos fuentes muestran un ciclo de actividad decreciente a medida que aumenta el episodio temporal en todos los criterios, esto puede ser explicado a que conforme el episodio temporal es mayor se incluyen en el mismo partes activas e inactivas haciendo que el flujo promedio se vea disminuido viendose reflejado en el número de puntos que cumplen el criterio de actividad.

Para cada fuente de la muestra se estudió con una contribución EBL y sin contribución EBL. Se detallan los resultados del ciclo de actividad para ambos casos y se reporta que la diferencia entre ellos no es significativa salvo en algunos casos donde se puede adjudicar a variaciones estadísticas en la reconstrucción de las curvas

de luz o, para el caso del criterio de Tluczykont y de Vercellone + Tluczykont, variaciones en el ajuste de las funciones gaussiana + log normal.

A pesar de las diferencias que se encuentran entre los ciclos de actividad de los 4 criterios y de los cambios que presentan con diferentes episodios temporales, existe una tendencia del nivel de actividad. El blazar 3C 279 es el que presenta más actividad que las demás fuentes de la muestra, lo siguen los blazares TXS 0506+056 y OP 313 con un ciclo de actividad comparable y por último el blazar Mkn 421 con el menor ciclo de actividad y cuyo valor está en coincidencia con el resultado reportado por Patricelli et al. [2014] para mayores energías ($> \text{TeV}$).

CONCLUSIONES

1. El ciclo de actividad de TXS 0506+056, el cual presenta una coincidencia espacial y temporal con un evento de neutrino no es particularmente activo, lo cual podría colocar restricciones en modelos teóricos.
2. Los ciclos de actividad obtenidos para esta pequeña muestra no presentan una aparente correlación con el corrimiento al rojo z .
3. Las curvas de luz, la distribución de espectro de energía y el ciclo de actividad de las fuentes de la muestra no se ven afectadas significativamente con la corrección de EBL del modelo Franceschini.
4. Las dos fuentes más brillantes de la muestra, 3C 279 y Mkn 421, no tienen similitud en su ciclo de actividad. Pese a ser muy brillantes, hasta la fecha no han presentado una coincidencia con eventos de neutrinos por lo que indica que tanto los ciclos de actividad como el brillo están probablemente conectados a poblaciones de electrones y que la actividad que presentan es de una emisión leptónica.
5. En los casos de TXS 0506+056 y OP 313, el ciclo de actividad se ve afectado por el tamaño del episodio temporal porque estas fuentes presentan muchos límites superiores en su curva de luz, y por lo tanto el umbral de actividad varía para el caso de Vercellone y zonas bajas y para el caso de de Tluczykont y Vercellone + Tluczykont el ajuste no era el más óptimo.

RECOMENDACIONES

1. Extender la muestra de blazares considerando diferentes tipos de AGNs y diferentes propiedades físicas como luminosidades, corrimientos al rojo o variabilidad.
2. Utilizar el mayor tiempo de observación posible para obtener más datos sobre las fuentes y así poder hacer un estudio más conclusivo.
3. Hacer un análisis multifrecuencia del ciclo de actividad, es decir, comparar resultados de ciclos de actividad a otras longitudes de onda, que eventualmente puede ayudar a inferir procesos de emisión o las regiones de emisión.

BIBLIOGRAFÍA

- M. Aartsen, K. Abraham, M. Ackermann, J. Adams, J. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, D. Altmann, K. Andeen, T. Anderson, et al. Observation and characterization of a cosmic muon neutrino flux from the northern hemisphere using six years of icecube data. *The Astrophysical Journal*, 833(1):3, 2016.
- M. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, D. Altmann, K. Andeen, T. Anderson, I. Ansseau, et al. The icecube neutrino observatory: instrumentation and online systems. *Journal of Instrumentation*, 12(03):P03012, 2017.
- A. Abdo, M. Ackermann, I. Agudo, M. Ajello, H. Aller, M. Aller, E. Angelakis, A. Arkharov, M. Axelsson, U. Bach, et al. The spectral energy distribution of fermi bright blazars. *The Astrophysical Journal*, 716(1):30, 2010a.
- A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, E. Antolini, W. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, et al. The first catalog of active galactic nuclei detected by the fermi large area telescope. *The Astrophysical Journal*, 715(1):429, 2010b.
- A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, W. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, B. Baughman, et al. Bright active galactic nuclei source list from the first three months of the fermi large area telescope all-sky survey. *The Astrophysical Journal*, 700(1):597, 2009.
- A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, E. Antolini, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, K. Bechtol, R. Bellazzini, et al. Gamma-ray light curves and variability of bright fermi-detected blazars. *The Astrophysical Journal*, 722(1):520, 2010c.
- F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert, W. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, et al. Fermi large area telescope third source catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 218(2):23, 2015.

- M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, E. Antolini, W. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, et al. The second catalog of active galactic nuclei detected by the fermi large area telescope. *The Astrophysical Journal*, 743(2):171, 2011.
- M. Ackermann, M. Ajello, W. Atwood, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, J. B. Gonzalez, R. Bellazzini, E. Bissaldi, et al. The third catalog of active galactic nuclei detected by the fermi large area telescope. *The Astrophysical Journal*, 810(1):14, 2015.
- M. Ackermann, R. Anantua, K. Asano, L. Baldini, G. Barbiellini, D. Bastieri, J. B. Gonzalez, R. Bellazzini, E. Bissaldi, R. Blandford, et al. Minute-timescale >100 mev γ -ray variability during the giant outburst of quasar 3c 279 observed by fermi-lat in 2015 june. *The Astrophysical journal letters*, 824(2):L20, 2016.
- C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. A. Prieto, S. F. Anderson, T. Anderton, B. H. Andrews, É. Aubourg, S. Bailey, E. Balbinot, R. Barnes, et al. The ninth data release of the sloan digital sky survey: first spectroscopic data from the sdss-iii baryon oscillation spectroscopic survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 203(2):21, 2012.
- M. Ajello, R. Romani, D. Gasparri, M. S. Shaw, J. Bolmer, G. Cotter, J. Finke, J. Greiner, S. Healey, O. King, et al. The cosmic evolution of fermi bl lacertae objects. *The Astrophysical Journal*, 780(1):73, 2013.
- R. V. Ambartsumian. A life in astrophysics. selected papers of viktor a. ambartsumian. *Astrophysics*, 41(4):328–330, 1998.
- R. Antonucci. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 31:473–521, 1993.
- T. Armstrong, A. M. Brown, and P. M. Chadwick. Fermi-lat high-z active galactic nuclei and the extragalactic background light. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470(4):4089–4098, 2017.
- W. Atwood, R. Bagagli, L. Baldini, R. Bellazzini, G. Barbiellini, F. Belli, T. Borden, A. Brez, M. Brigida, G. Caliandro, et al. Design and initial tests of the tracker-converter of the gamma-ray large area space telescope. *Astroparticle Physics*, 28(4-5):422–434, 2007.

- W. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, B. Anderson, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, D. Band, G. Barbiellini, et al. The large area telescope on the fermi gamma-ray space telescope mission. *The Astrophysical Journal*, 697(2): 1071, 2009.
- R. Blandford. Present and future blazar variability. In *Blazar Continuum Variability*, volume 110, page 475, 1996.
- R. Blandford and D. Payne. Hydromagnetic flows from accretion discs and the production of radio jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 199 (4):883–903, 1982.
- M. Böttcher, A. Reimer, K. Sweeney, and A. Prakash. Leptonic and hadronic modeling of fermi-detected blazars. *The Astrophysical Journal*, 768(1):54, 2013.
- J. Bregeon, E. Charles, et al. Fermi-lat data reprocessed with updated calibration constants. *arXiv preprint arXiv:1304.5456*, 2013.
- E. M. Burbidge and F. D. Rosenberg. The redshift of the quasi-stellar radio source 3c 279. *The Astrophysical Journal*, 142:1673, 1965.
- A. L. Cannon. *A Comparison Study of Intermediate Frequency BL Lacs and High Frequency BL Lacs Detected by VERITAS and Fermi LAT*. PhD thesis, University College Dublin, 2012.
- W. Cash. Parameter estimation in astronomy through application of the likelihood ratio. *apj*, 228:939–947, Mar. 1979. doi: 10.1086/156922.
- C. Cheung. Detection of optical synchrotron emission from the radio jet of 3c 279. *The Astrophysical Journal Letters*, 581(1):L15, 2002.
- B. T. Cleveland, T. Daily, J. Raymond Davis, J. R. Distel, K. Lande, C. K. Lee, P. S. Wildenhain, and J. Ullman. Measurement of the solar electron neutrino flux with the homestake chlorine detector. *The Astrophysical Journal*, 496(1):505–526, mar 1998. doi: 10.1086/305343. URL <https://doi.org/10.1086%2F305343>.
- H. D. Curtis. Descriptions of 762 Nebulae and Clusters Photographed with the Crossley Reflector. *Publications of Lick Observatory*, 13:9–42, 1918.
- C. Dermer and B. Lott. On leptonic models for blazars in the fermi era. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 355, page 012010. IOP Publishing, 2012.

- C. D. Dermer and R. Schlickeiser. On the location of the acceleration and emission sites in gamma-ray blazars. In *International Astronomical Union Colloquium*, volume 142, pages 945–948. Cambridge University Press, 1994.
- D. Eichler. High-energy neutrino astronomy—a probe of galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, 232:106–112, 1979.
- B. Fanaroff and J. Riley. The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 167(1):31P–36P, 1974.
- E. A. Fath. The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters. *Lick Observatory Bulletin*, 5:71–77, 1909. doi: 10.5479/ADS/bib/1909LicOB.5.71F.
- J. D. Finke and S. Razzaque. Constraints on the extragalactic background light from very high energy gamma-ray observations of blazars. *The Astrophysical Journal*, 698(2):1761, 2009.
- A. Franceschini, G. Rodighiero, and M. Vaccari. Extragalactic optical-infrared background radiation, its time evolution and the cosmic photon-photon opacity. *Astronomy & Astrophysics*, 487(3):837–852, 2008.
- C. M. Gaskell. What broad emission lines tell us about how active galactic nuclei work. *New Astronomy Reviews*, 53(7-10):140–148, 2009.
- G. Ghisellini and P. Madau. On the origin of the γ -ray emission in blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 280(1):67–76, 1996.
- R. C. Gilmore, P. Madau, J. R. Primack, R. S. Somerville, and F. Haardt. GeV gamma-ray attenuation and the high-redshift uv background. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(4):1694–1708, 2009.
- V. Ginzburg and S. Syrovatsk. Developments in the theory of synchrotron radiation and its reabsorption. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 7(1):375–420, 1969.
- P. Giommi, S. Colafrancesco, E. Cavazzuti, M. Perri, and C. Pittori. Non-thermal cosmic backgrounds from blazars: the contribution to the cmb, x-ray and γ -ray backgrounds. *Astronomy & Astrophysics*, 445(3):843–855, 2006.

- J. E. Grove and W. N. Johnson. The calorimeter of the fermi large area telescope. In *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*, volume 7732, page 77320J. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- A. W. Guthmann, M. Georganopoulos, A. Marcowith, and K. Manolakou. *Relativistic flows in astrophysics*, volume 589. Springer Science & Business Media, 2002.
- R. Hartman, D. Bertsch, C. Fichtel, S. Hunter, G. Kanbach, D. Kniffen, P. Kwok, Y. Lin, J. Mattox, H. Mayer-Hasselwander, et al. Detection of high-energy gamma radiation from quasar 3c 279 by the egret telescope on the compton gamma ray observatory. *The Astrophysical Journal*, 385:L1–L4, 1992.
- M. G. Hauser and E. Dwek. The cosmic infrared background: measurements and implications. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 39(1):249–307, 2001.
- M. Hayashida, K. Nalewajko, G. Madejski, M. Sikora, R. Itoh, M. Ajello, R. Blandford, S. Buson, J. Chiang, Y. Fukazawa, et al. Rapid variability of blazar 3c 279 during flaring states in 2013- 2014 with joint fermi-lat, nustar, swift, and ground-based multi-wavelength observations. *The Astrophysical Journal*, 807(1):79, 2015.
- D. Heeschen, T. Krichbaum, C. Schalinski, and A. Witzel. Rapid variability of extragalactic radio sources. *The Astronomical Journal*, 94:1493–1507, 1987.
- K. Hirotani. Composition of active galactic nuclei jets: pair-plasma dominance in the 3c 345 and 3c 279 jets. *arXiv preprint astro-ph/0009487*, 2000.
- P. F. Hopkins, R. Hickox, E. Quataert, and L. Hernquist. Are most low-luminosity active galactic nuclei really obscured? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398(1):333–349, 2009.
- IceCube Collaboration et al. Neutrino emission from the direction of the blazar txs 0506+ 056 prior to the icecube-170922a alert. *Science*, 361(6398):147–151, 2018.
- C. Impey and S. Tapia. The optical polarization properties of quasars. *The Astrophysical Journal*, 354:124–139, 1990.
- Y. Inoue, S. Inoue, M. A. Kobayashi, R. Makiya, Y. Niino, and T. Totani. Extragalactic background light from hierarchical galaxy formation: gamma-ray attenuation up to the epoch of cosmic reionization and the first stars. *The Astrophysical Journal*, 768(2):197, 2013.

- G. Kanbach, D. Bertsch, A. Favale, C. Fichtel, R. Hartman, R. Hofstadter, E. Hughes, S. Hunter, B. Hughlock, D. Kniffen, et al. The project egret (energetic gamma-ray experiment telescope) on nasa's gamma-ray observatory gro. *Space Science Reviews*, 49(1-2):69–84, 1989.
- K. I. Kellermann and F. N. Owen. 13. radio galaxies and quasars.
- T. M. Kneiske, T. Bretz, K. Mannheim, and D. Hartmann. Implications of cosmological gamma-ray absorption-ii. modification of gamma-ray spectra. *Astronomy & Astrophysics*, 413(3):807–815, 2004.
- H. Krawczynski, S. Hughes, D. Horan, F. Aharonian, M. Aller, H. Aller, P. Boltwood, J. Buckley, P. Coppi, G. Fossati, et al. Multiwavelength observations of strong flares from the tev blazar 1es 1959+ 650. *The Astrophysical Journal*, 601(1):151, 2004.
- E. Limpert, W. A. Stahel, and M. Abbt. Log-normal distributions across the sciences: keys and clues: on the charms of statistics, and how mechanical models resembling gambling machines offer a link to a handy way to characterize log-normal distributions, which can provide deeper insight into variability and probability—normal or log-normal: that is the question. *BioScience*, 51(5):341–352, 2001.
- M. L. Lister, M. Aller, H. Aller, D. C. Homan, K. Kellermann, Y. Y. Kovalev, A. Pushkarev, J. Richards, E. Ros, and T. Savolainen. Mojave. x. parsec-scale jet orientation variations and superluminal motion in active galactic nuclei. *The Astronomical Journal*, 146(5):120, 2013.
- F. Liu, B. Liu, and G. Xie. The long-term optical behavior of mkn 421. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 123(3):569–574, 1997.
- E. Massaro, M. Perri, P. Giommi, and R. Nesci. Log-parabolic spectra and particle acceleration in the bl lac object mkn 421: Spectral analysis of the complete beposax wide band x-ray data set. *Astronomy & Astrophysics*, 413(2):489–503, 2004.
- E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, P. Marchegiani, A. Maselli, M. Perri, S. Piranomonte, and S. Scavi. Roma-bzcat: a multifrequency catalogue of blazars. *Astronomy & Astrophysics*, 495(2):691–696, 2009.

- J. Mattox, D. L. Bertsch, J. Chiang, B. Dingus, S. W. Digel, J. A. Esposito, J. M. Fierro, R. C. Hartman, S. Hunter, G. Kanbach, D. Kniffen, C. Lin, D. J. Macomb, H. A. Mayer-Hasselwander, P. F. Michelson, C. von Montigny, R. Mukherjee, P. L. Nolan, P. V. Ramanamurthy, and T. D. Willis. The likelihood analysis of egret data. *The Astrophysical Journal*, 461:396, 03 1996. doi: 10.1086/177068.
- A. A. Moiseev, J. F. Ormes, R. C. Hartman, T. E. Johnson, J. W. Mitchell, and D. J. Thompson. Observation and simulations of the backslash effects in high-energy γ -ray telescopes containing a massive calorimeter. *Astroparticle Physics*, 22(3-4):275–283, 2004.
- P. Padovani, E. Perlman, P. Giommi, R. Sambruna, L. R. Jones, A. Tzioumis, and J. Reynolds. The deep x-ray radio blazar survey (dxrbs). In *Looking Deep in the Southern Sky*, pages 187–193. Springer, 1999.
- B. Patricelli, M. González, N. Fraija, A. Marinelli, et al. Estimation of the tev gamma-ray duty cycle of mrk 421 with milagro. *arXiv preprint arXiv:1401.3348*, 2014.
- M. Pérez. Centaurus a como fuente de rayos cósmicos ultra energéticos. Master’s thesis, Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Astronomía, 2012.
- C. Pittori, E. Cavazzuti, S. Colafrancesco, and P. Giommi. Blazar duty-cycle at γ -ray frequencies: constraints from extragalactic background radiation and prospects for agile and glast. *Astrophysics and Space Science*, 309(1-4):89–94, 2007.
- J. R. Primack, J. S. Bullock, and R. S. Somerville. Observational gamma-ray cosmology. In *AIP Conference Proceedings*, volume 745, pages 23–33. AIP, 2005.
- M. Punch, C. W. Akerlof, M. Cawley, M. Chantell, D. Fegan, S. Fennell, J. Gaidos, J. Hagan, A. Hillas, Y. Jiang, et al. Detection of tev photons from the active galaxy markarian 421. *nature*, 358(6386):477, 1992.
- A. Quirrenbach, A. Witzel, T. Kirchbaum, C. Hummel, R. Wegner, C. Schalinski, M. Ott, A. Alberdi, and M. Rioja. Statistics of intraday variability in extragalactic radio sources. *Astronomy and Astrophysics*, 258:279–284, 1992.
- F. Reines, C. L. Cowan, F. B. Harrison, A. D. McGuire, and H. W. Kruse. Detection of the free antineutrino. *Phys. Rev.*, 117:159–173, Jan 1960. doi: 10.1103/PhysRev.117.159. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.117.159>.

- P. Saikia, E. Körding, and H. Falcke. Lorentz factor distribution of blazars from the optical fundamental plane of black hole activity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461(1):297–303, 2016.
- R. Scarpa and R. Falomo. Are high polarization quasars and bl lacertae objects really different? a study of the optical spectral properties. *Astronomy and Astrophysics*, 325:109–123, 1997.
- J. L. Schmitt. Bl lac identified as a radio source. *Nature*, 218(5142):663, 1968.
- C. K. Seyfert. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. *apj*, 97:28, Jan. 1943. doi: 10.1086/144488.
- M. S. Shaw, R. W. Romani, G. Cotter, S. E. Healey, P. F. Michelson, A. C. Readhead, J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, O. G. King, and W. J. Potter. Spectroscopy of the largest ever γ -ray-selected bl lac sample. *The Astrophysical Journal*, 764(2):135, 2013.
- M. Sikora and G. Madejski. On pair content and variability of subparsec jets in quasars. *The Astrophysical Journal*, 534(1):109, 2000.
- H. Sol, G. Pelletier, and E. Asseo. Two-flow model for extragalactic radio jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 237(2):411–429, 1989.
- F. W. Stecker, M. A. Malkan, and S. Scully. Intergalactic photon spectra from the far-ir to the uv lyman limit for $0 < z < 6$ and the optical depth of the universe to high-energy gamma rays. *The Astrophysical Journal*, 648(2):774, 2006.
- B. Sversut Arsioli, U. Barres de Almeida, E. Prandini, B. Fraga, and L. Foffano. Extreme & high synchrotron peaked blazars at the limit of fermi-lat detectability: the gamma-ray spectrum of 1bigb sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 04 2018. doi: 10.1093/MNRAS/STY1975.
- J. R. Taylor. *Introducción al análisis de errores*. Editorial Reverté, 2014.
- M. Tluczykont, M. Shayduk, O. Kalekin, and E. Bernardini. Long-term gamma-ray lightcurves and high state probabilities of active galactic nuclei. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 60, page 318. IOP Publishing, 2007.
- Y. Uchida and K. Shibata. Magnetodynamical acceleration of co and optical bipolar flows from the region of star formation. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 37:515–535, 1985.

- C. M. Urry and P. Padovani. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *pas*, 107:803, Sept. 1995. doi: 10.1086/133630.
- S. Vercellone, S. Soldi, A. Chen, and M. Tavani. On the duty-cycle of γ -ray blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 353(3):890–902, 2004.
- M. Véron-Cetty and P. Véron. The emission line spectrum of active galactic nuclei and the unifying scheme. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 10(1-2):81–133, 2000.
- R. Wagner and M. Collaboration. Scientific highlights from observations of active galactic nuclei with the magic telescope. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1085, pages 399–402. AIP, 2008.
- J. Wardle, D. Homan, R. Ojha, and D. Roberts. Electron–positron jets associated with the quasar 3c279. *Nature*, 395(6701):457, 1998.
- A. S. Wilson and E. J. Colbert. The difference between radio-loud and radio-quiet active galaxies. *arXiv preprint astro-ph/9408005*, 1994.
- J.-H. Woo and C. M. Urry. Active galactic nucleus black hole masses and bolometric luminosities. *The Astrophysical Journal*, 579(2):530, 2002.
- M. Zeilik. *Astronomy: the evolving universe*. Cambridge University Press, 2002.

A. Apéndice: Resultados completos

A.1. Mkn421

Se presentan los histogramas de flujo del blazar Mkn 421 con sus ajustes, así como los resultados completos del ciclo de actividad inferido considerando los diferentes tamaños de episodios temporal así como tomando en cuenta la contribución del modelo EBL y sin tomar en cuenta la contribución EBL.

Histogramas del criterio Tluczykont para Mkn 421

Con contribución del modelo EBL

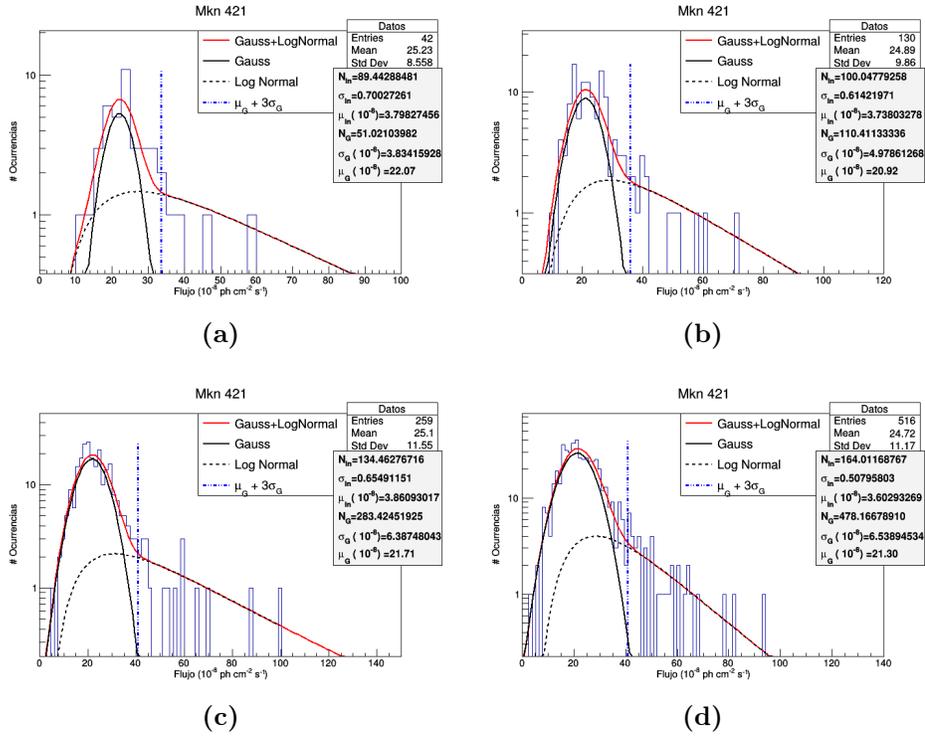


Figura A.1. Histogramas del blazar Mkn 421 con los 4 episodios temporales con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los histogramas a diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

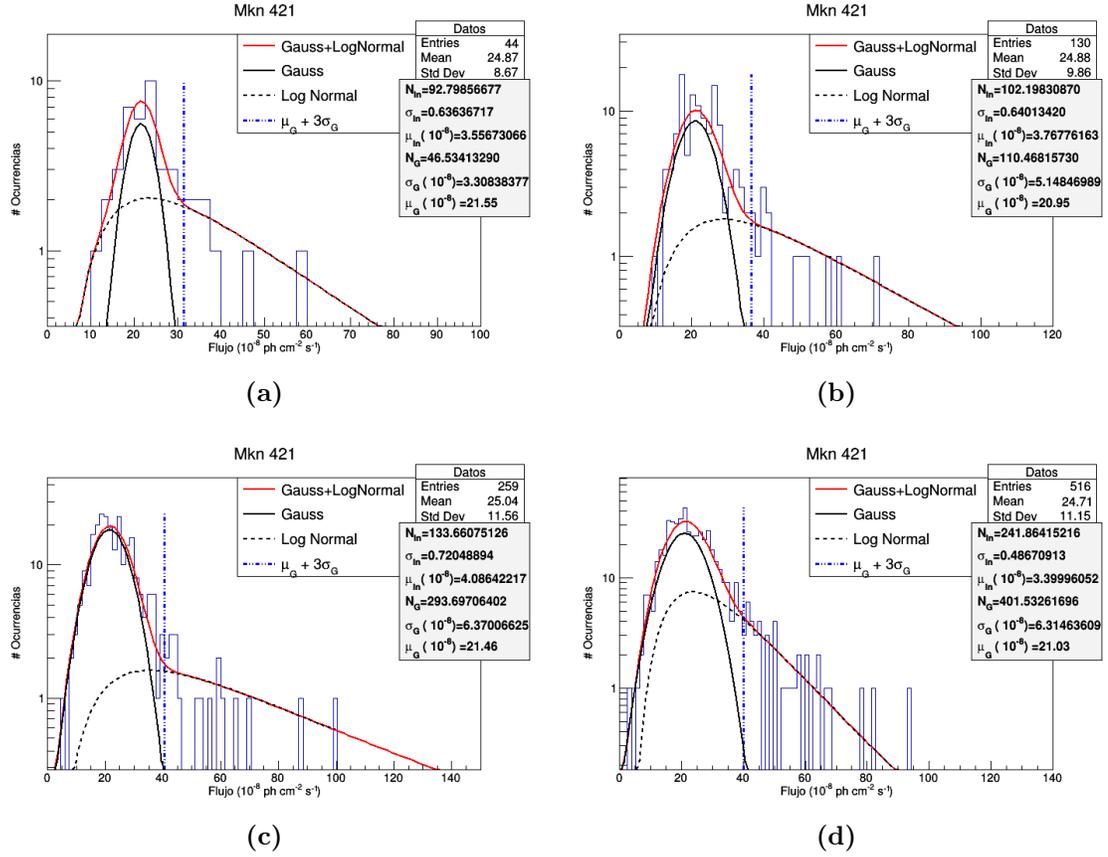


Figura A.2. Histogramas del blazar Mkn 421 con los 4 episodios temporales sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los histogramas a diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana.

Ciclo de actividad del criterio Tluczykont para Mkn 421 Con contribución del modelo EBL

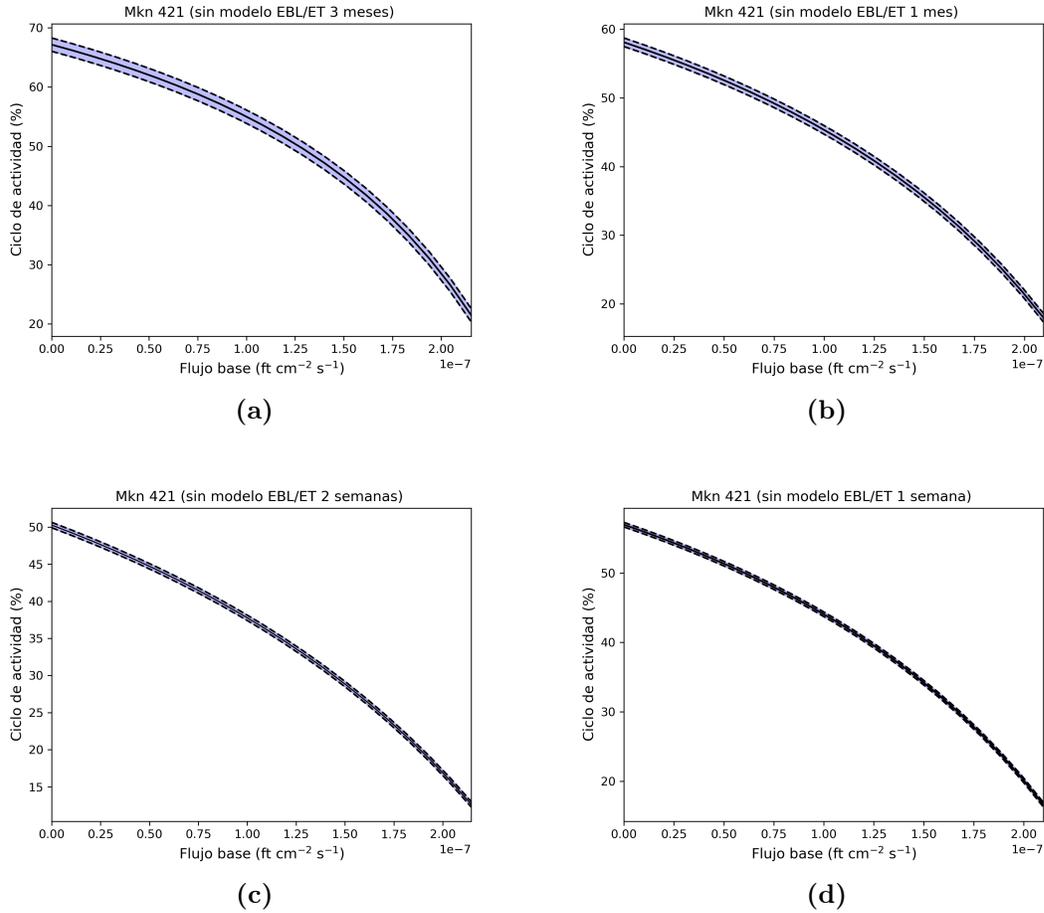


Figura A.3. Ciclos de actividad de Mkn 421 con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

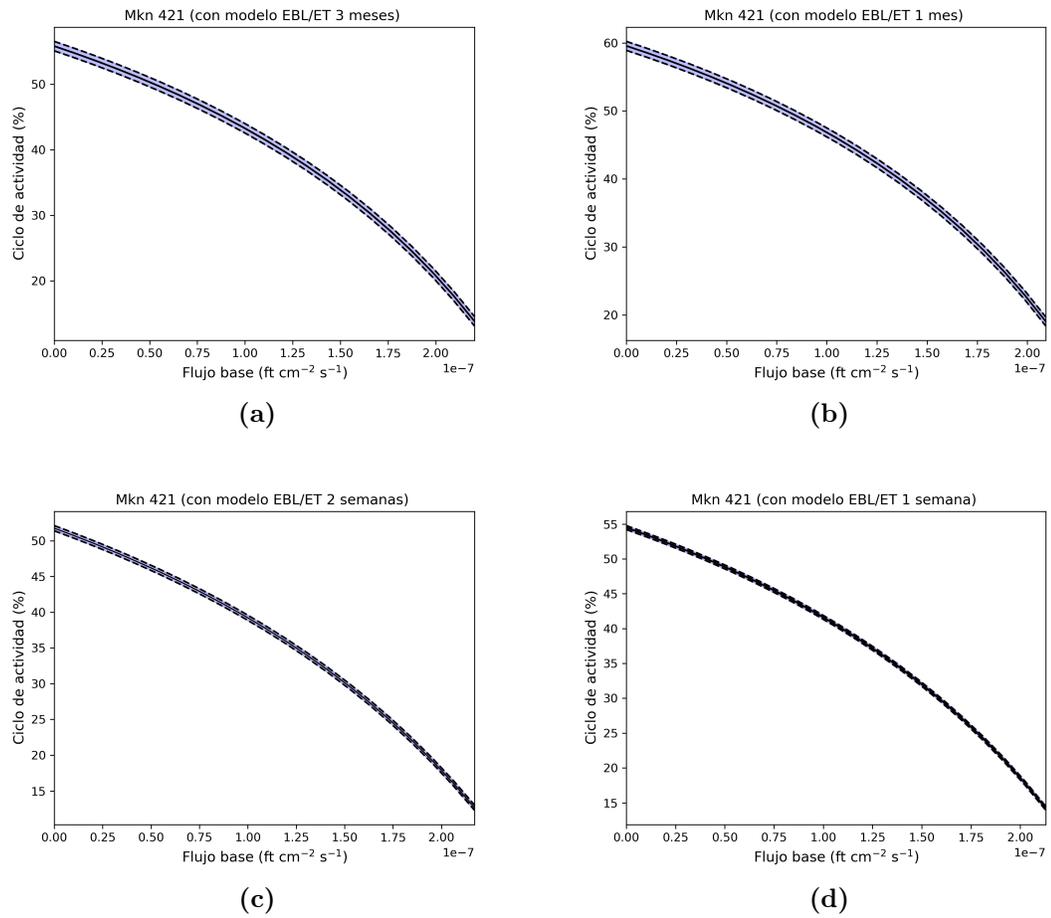


Figura A.4. Ciclos de actividad de Mkn 421 sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana

A.2. TXS 0506+056

Se presentan los histogramas de flujo del blazar TXS 0506+056 con sus ajustes, así como los resultados completos del ciclo de actividad inferido considerando los diferentes tamaños de episodios temporal así como tomando en cuenta la contribución del modelo EBL y sin tomar en cuenta la contribución EBL.

A.2.1. Criterio Vercellone et al. [2004]

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	7.93 \pm 0.88	1.19×10^{-7}	11.90 \pm 0.15
1 mes	7.83 \pm 0.55	1.17×10^{-7}	8.53 \pm 0.03
2 semanas	9.69 \pm 0.47	1.45×10^{-7}	6.95 \pm 0.01
1 semana	9.07 \pm 0.29	1.36×10^{-7}	6.73 \pm 0.01
Promedio	8.63 \pm 0.54	1.29×10^{-7}	8.53 \pm 0.05
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	7.85 \pm 0.89	1.18×10^{-7}	11.91 \pm 0.15
1 mes	7.74 \pm 0.50	1.16×10^{-7}	7.75 \pm 0.03
2 semanas	8.07 \pm 0.40	1.21×10^{-7}	8.11 \pm 0.02
1 semana	8.99 \pm 0.29	1.35×10^{-7}	6.55 \pm 0.01
Promedio	8.16 \pm 0.52	1.22×10^{-7}	8.58 \pm 0.05

Tabla A.1. Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar TXS 0506+056. La parte superior de la tabla muestra resultados obtenidos considerando la contribución de EBL y la parte inferior muestra los resultados sin contribución EBL. Los errores en el valor del umbral ($1.5\bar{f}$) no se muestran pues son los mismos que los errores del flujo base.

A.2.2. Criterio zonas inactivas

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f}_b \pm \Delta\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$1.5f_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC±ΔDC (%)
3 meses	4.96±0.25	7.44×10^{-8}	28.57±0.35
1 mes	4.74±0.16	7.11×10^{-8}	29.46±0.12
2 semanas	5.53±0.18	8.30×10^{-8}	19.31±0.04
1 semana	6.11±0.09	9.16×10^{-8}	13.08±0.01
Promedio	5.34±0.17	8.00×10^{-8}	22.61±0.13
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f}_b \pm \Delta\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$1.5f_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC±ΔDC (%)
3 meses	4.90±0.24	7.35×10^{-8}	28.57±0.35
1 mes	4.70±0.16	7.04×10^{-8}	29.46±0.11
2 semanas	5.05±0.12	7.58×10^{-8}	23.55±0.05
1 semana	6.05±0.09	9.07×10^{-8}	13.46±0.01
Promedio	5.18±0.15	7.76×10^{-8}	23.76±0.13

Tabla A.2. En la parte superior de la tabla se muestran los resultados del ciclo de actividad para el criterio de zonas inactivas del blazar TXS 0506+056 con contribución EBL y en la parte inferior de la tabla se muestran los resultados sin contribución EBL. EL error del umbral ($1.5\bar{f}_b$) es el mismo que para el flujo base (\bar{f}_b).

A.2.3. Criterio Tluczykont et al. [2007]

Con modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	4.72±0.48	8.62±0.89	46.12±3.65	55.86±3.65	33.49±3.65
1 mes	4.76±0.30	8.10±0.62	40.97±2.02	50.71±2.02	28.66±2.02
2 semanas	7.37±0.59	17.10±1.01	25.40±0.58	36.30±0.58	12.02±0.58
1 semana	7.11±0.17	14.10±0.31	31.93±0.48	44.87±0.48	14.90±0.48
Promedio	5.99±0.39	11.98±0.71	36.11±1.68	46.94±1.68	22.26±1.68
Sin modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	4.88±0.11	9.85±2.05	40.38±3.02	50.49±3.02	27.51±3.02
1 mes	4.55±0.38	7.83±0.77	46.21±2.28	56.48±2.28	32.67±2.28
2 semanas	5.08±0.29	9.63±0.46	51.57±1.84	62.14±1.84	36.99±1.84
1 semana	6.97±0.19	14.54±0.37	32.13±0.50	44.87±0.50	15.43±0.50
Promedio	5.37±0.24	10.46±0.91	42.57±1.91	53.50±1.91	28.15±1.91

Tabla A.3. Tabla de datos del blazar TXS 0506+056 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$), del ciclo de actividad promedio (\bar{DC}), del ciclo de actividad en los extremos mínimo (DC_0) y máximo (DC_μ) con contribución EBL y en la parte inferior están los datos sin la contribución EBL.

Histogramas del criterio Tluczykont para TXS 0506+056

Con contribución del modelo EBL

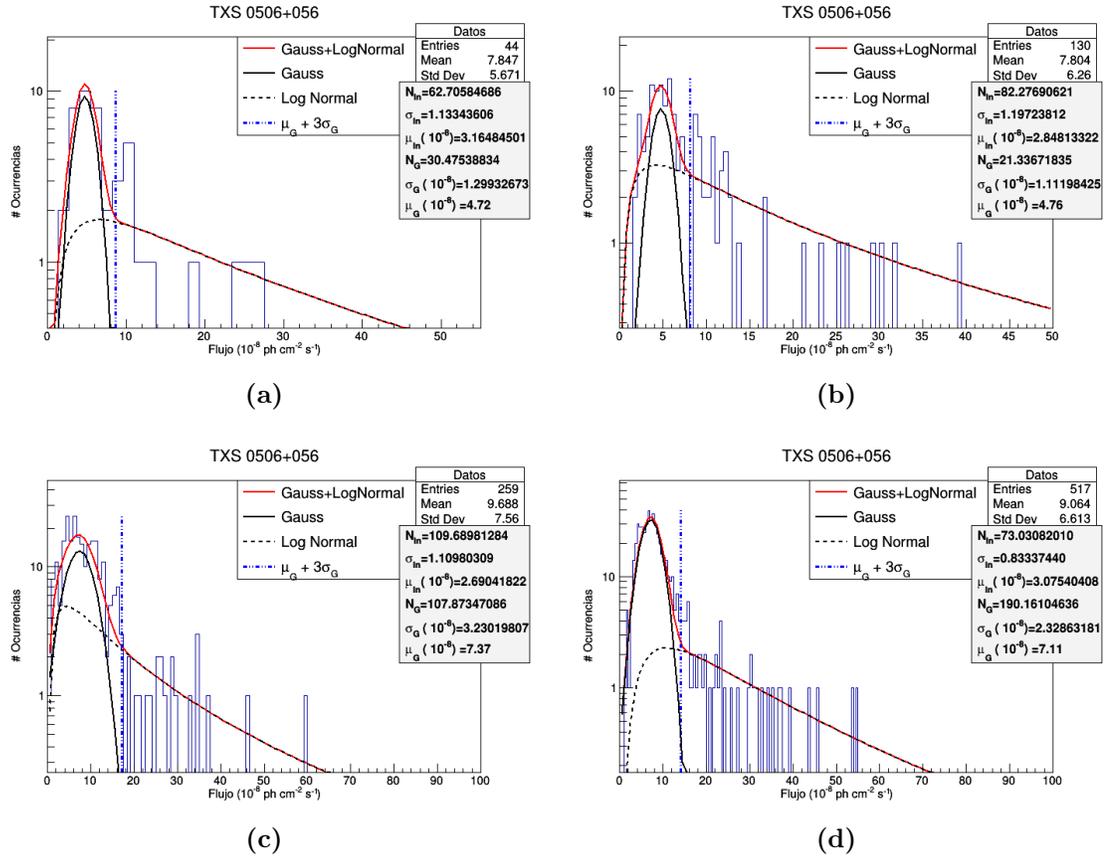


Figura A.5. Histogramas del blazar TXS 0506+956 con los 4 episodios temporales con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los histogramas a diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

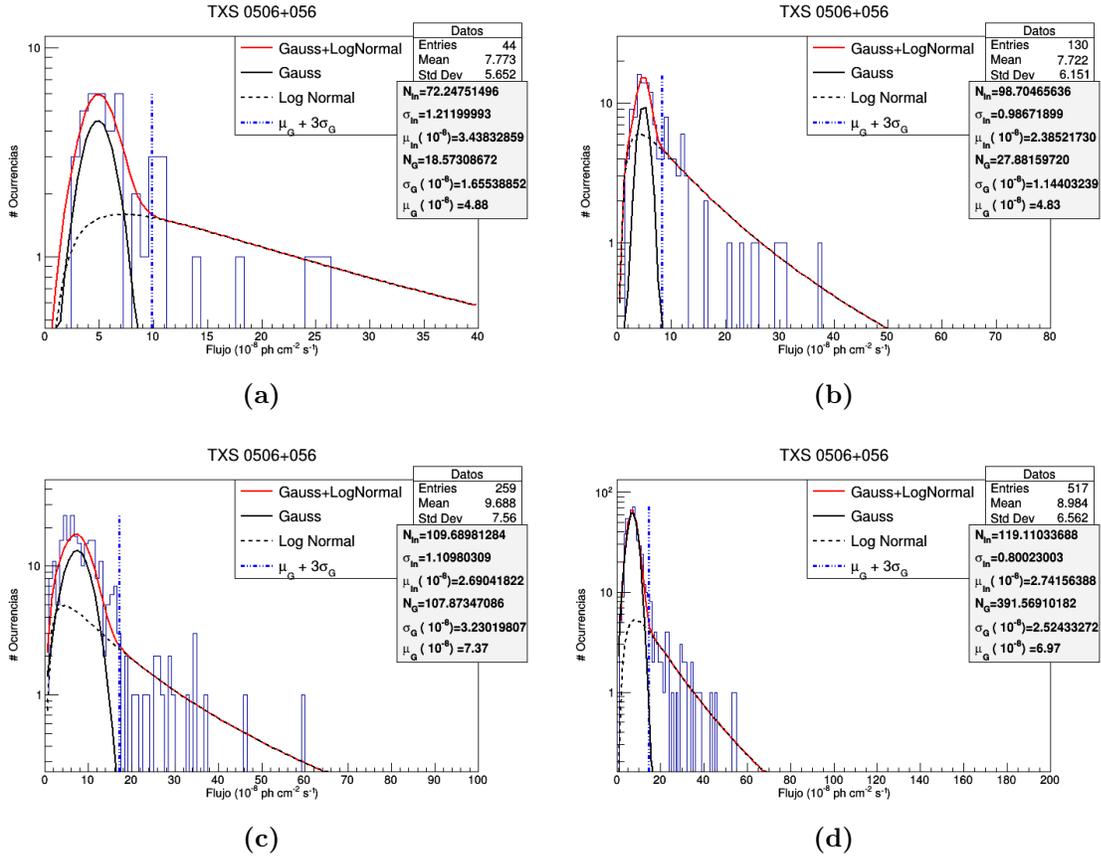


Figura A.6. Histogramas del blazar TXS 0506+956 con los 4 episodios temporales sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los histogramas a diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana.

Ciclo de actividad del criterio Tluczykont para TXS 0506+056 Con contribución del modelo EBL

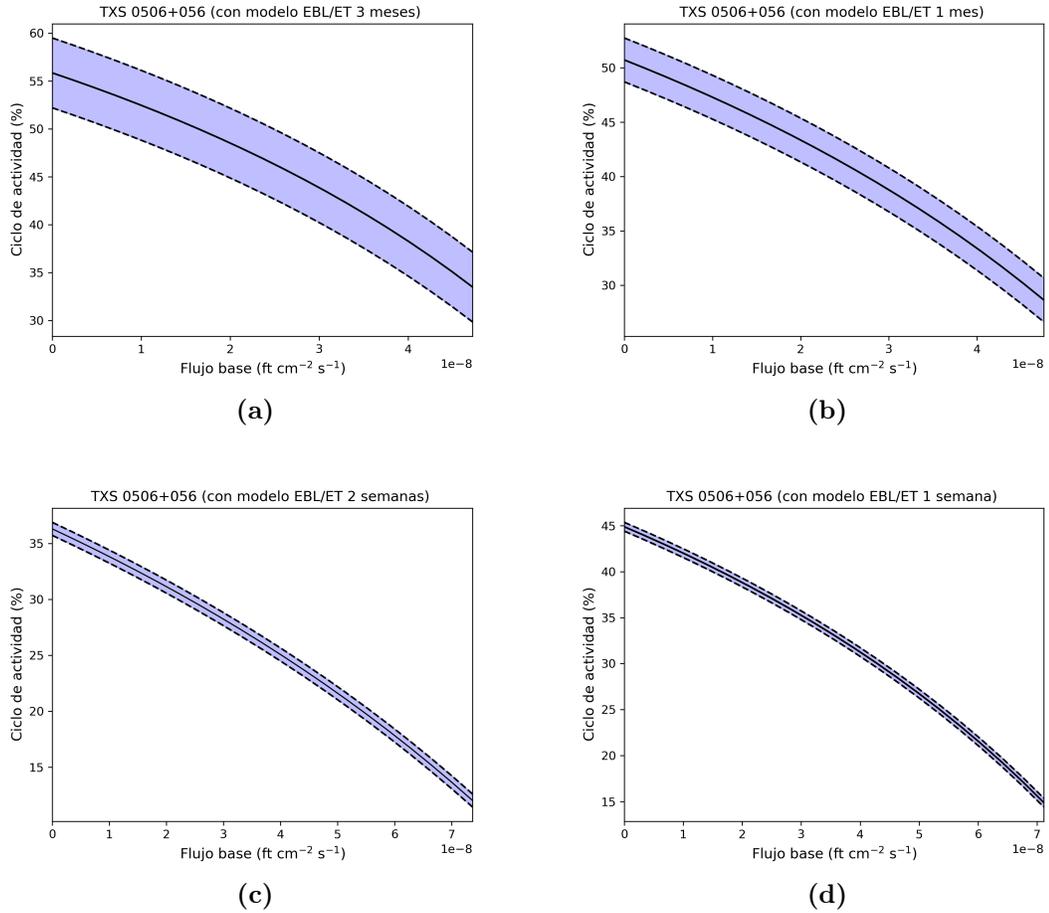


Figura A.7. Ciclos de actividad de TXS 0506+956 con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

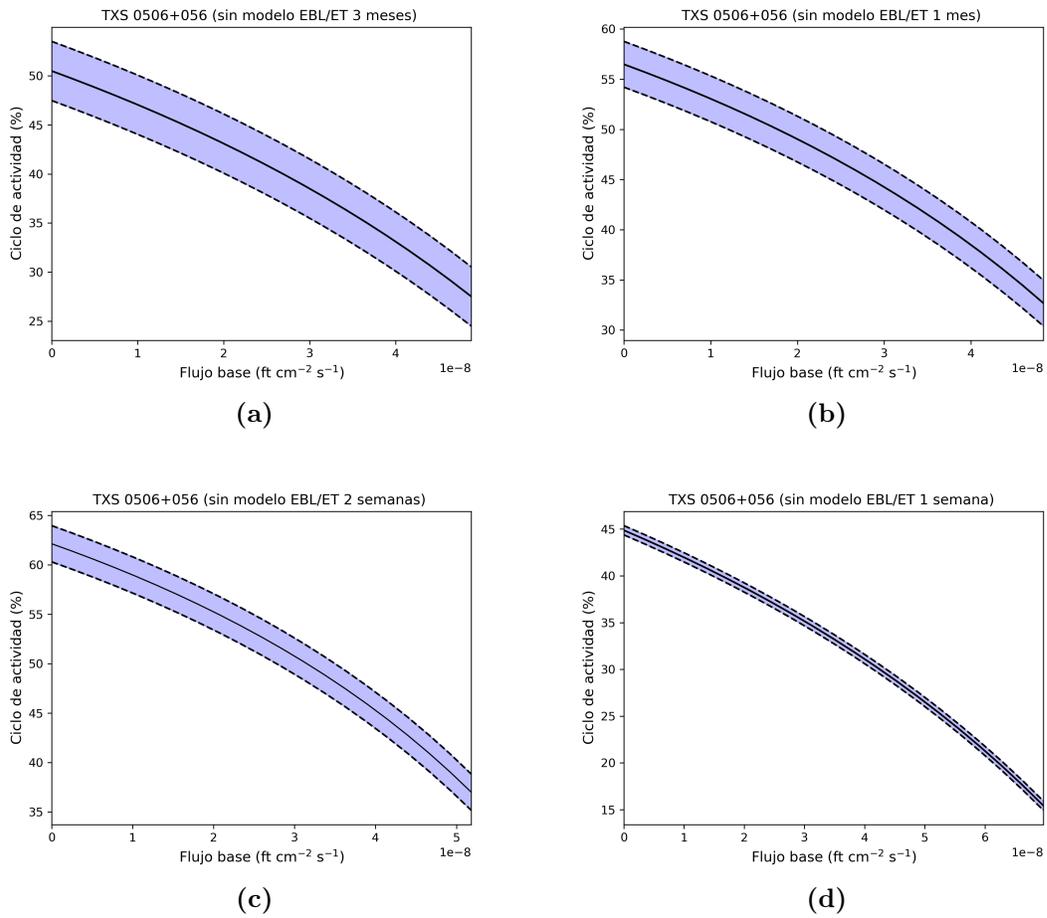


Figura A.8. Ciclos de actividad de TXS 0506+956 sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 1 mes, (c) 2 semanas y (d) 1 semana.

A.2.4. Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	DC±ΔDC (%)
3 meses	4.72±0.48	8.62±0.89	25.58±0.30
1 mes	4.76±0.30	8.10±0.62	20.77±0.08
2 semanas	7.37±0.59	17.10±1.01	5.77±0.01
1 semana	7.11±0.17	14.10±0.31	6.33±0.01
Promedio	5.99±0.39	11.98±0.71	14.61±0.10
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	DC±ΔDC (%)
3 meses	4.88±0.11	9.85±2.05	13.95±0.17
1 mes	4.38±0.39	8.26±0.74	21.53±0.08
2 semanas	5.18±0.29	9.79±0.46	13.08±0.03
1 semana	6.97±0.19	14.54±0.37	9.79±0.06
Promedio	5.35±0.25	10.61±0.91	14.598±0.09

Tabla A.4. Tabla de datos del blazar TXS 0506+056 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$) del criterio propuesto por Tluczykont, y del ciclo de actividad (DC) con EBL. En la parte inferior se muestran los datos sin EBL.

A.3. OP 313

Se presentan los histogramas de flujo del blazar OP 313 con sus ajustes, así como los resultados completos del ciclo de actividad inferido considerando los diferentes tamaños de episodios temporal así como tomando en cuenta la contribución del modelo EBL y sin tomar en cuenta la contribución EBL.

A.3.1. Criterio Vercellone et al. [2004]

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	4.60 \pm 0.55	6.90 $\times 10^{-8}$	11.90 \pm 0.15
1 mes	4.45 \pm 0.35	6.67 $\times 10^{-8}$	10.85 \pm 0.04
2 semanas	3.94 \pm 0.25	5.92 $\times 10^{-8}$	8.88 \pm 0.02
1 semana	4.85 \pm 0.22	7.27 $\times 10^{-8}$	7.88 \pm 0.01
Promedio	4.46 \pm 0.34	6.69 $\times 10^{-8}$	9.88 \pm 0.06
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-8}$	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	4.80 \pm 0.57	7.20 $\times 10^{-8}$	11.63 \pm 0.14
1 mes	4.50 \pm 0.36	6.75 $\times 10^{-8}$	10.77 \pm 0.04
2 semanas	4.55 \pm 0.28	6.82 $\times 10^{-8}$	8.85 \pm 0.02
1 semana	4.89 \pm 0.22	7.34 $\times 10^{-8}$	8.06 \pm 0.01
Promedio	4.69 \pm 0.36	7.03 $\times 10^{-8}$	9.83 \pm 0.05

Tabla A.5. Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar OP 313. La parte superior de la tabla muestra resultados obtenidos considerando la contribución de EBL y la parte inferior muestra los resultados sin contribución EBL. Los errores en el valor del umbral ($1.5\bar{f}$) no se muestran pues son los mismos que los errores del flujo base.

A.3.2. Criterio zonas inactivas

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f}_b \pm \Delta\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$1.5\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC±ΔDC (%)
3 meses	2.44±0.25	3.66×10^{-8}	45.23±0.55
1 mes	2.11±0.13	3.17×10^{-8}	35.66±0.14
2 semanas	2.00±0.07	3.01×10^{-8}	29.73±0.06
1 semana	2.22±0.06	3.33×10^{-8}	19.03±0.02
Promedio	2.19±0.13	3.29×10^{-8}	35.07±0.19
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f}_b \pm \Delta\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$1.5\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC±ΔDC (%)
3 meses	2.53±0.26	3.79×10^{-8}	44.19±0.53
1 mes	2.09±0.13	3.14×10^{-8}	35.38±0.14
2 semanas	2.16±0.09	3.24×10^{-8}	25.77±0.05
1 semana	2.25±0.06	3.37×10^{-8}	19.00±0.02
Promedio	2.26±0.14	3.39×10^{-8}	31.09±0.19

Tabla A.6. En la parte superior de la tabla se muestran los resultados del ciclo de actividad para el criterio de zonas inactivas del blazar OP 313 con contribución EBL y en la parte inferior de la tabla se muestran los resultados sin contribución EBL. EL error del umbral ($1.5\bar{f}_b$) es el mismo que para el flujo base (\bar{f}_b).

A.3.3. Criterio Tluczykont et al. [2007]

Con modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	–	–	–	–	–
1 mes	2.09±0.72	9.33±1.26	23.90±1.45	29.11±1.45	18.19±1.45
2 semanas	2.79±0.69	7.41±1.08	26.74±0.95	36.57±0.95	14.89±0.95
1 semana	1.37±0.17	3.63±0.32	76.50±3.60	79.23±3.60	73.30±3.60
Promedio	2.08±0.53	6.79±0.89	40.71±2.00	50.48±2.00	26.39±2.00
Sin modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	4.74±0.31	6.81±1.74	24.99±0.11	42.11±0.11	0.94±0.11
1 mes	1.99±0.73	10.35±0.13	22.04±1.35	26.75±1.35	16.95±1.35
2 semanas	4.43±7.52	11.81±11.96	15.66±0.06	27.69±0.06	0.98±0.06
1 semana	1.38±0.20	3.46±0.41	78.40±3.43	80.97±3.43	75.37±3.43
Promedio	3.14±2.19	8.11±3.86	35.27±1.24	41.38±1.24	26.56±1.24

Tabla A.7. Tabla de datos del blazar OP 313 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$), del ciclo de actividad promedio (\bar{DC}), del ciclo de actividad en los extremos mínimo (DC_0) y máximo (DC_μ) con contribución EBL y en la parte inferior están los datos sin la contribución EBL.

Histogramas del criterio Tluczykont para OP 313

Con contribución del modelo EBL

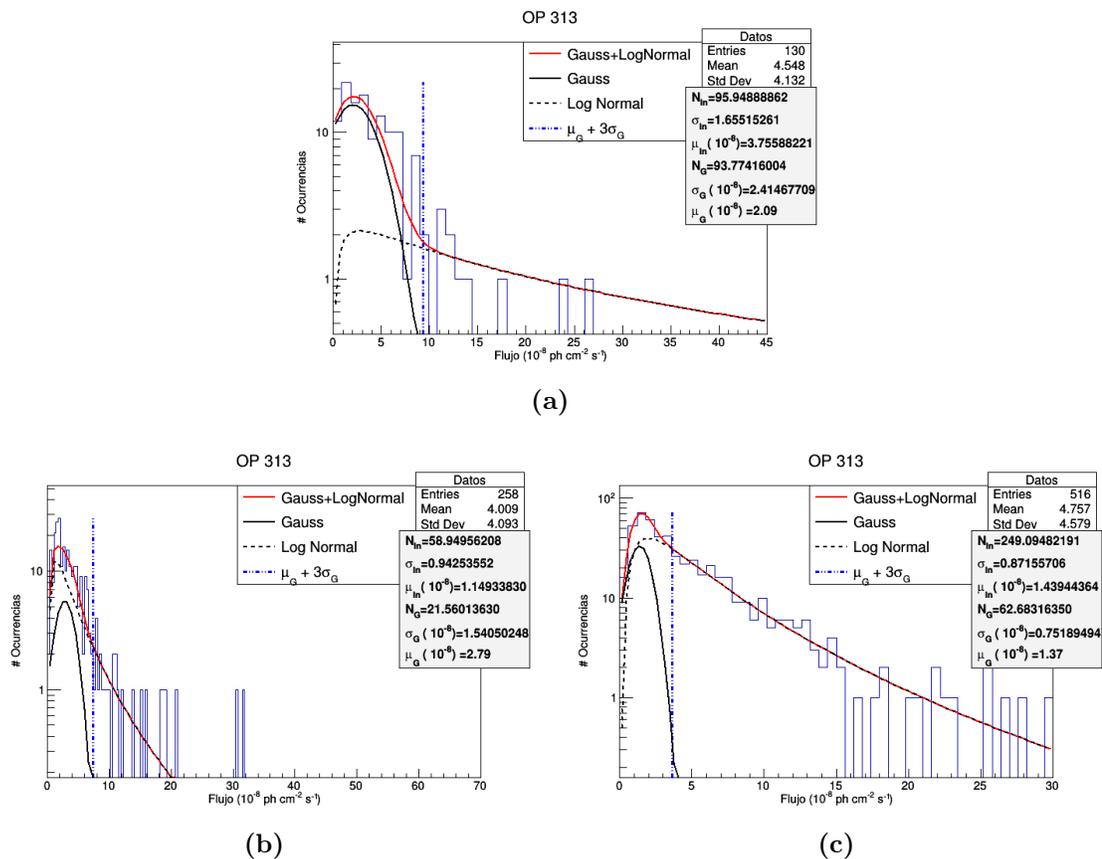


Figura A.9. Histogramas del blazar OP 313 con 3 episodios temporales con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 1 mes, (b) 2 semanas y (c) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

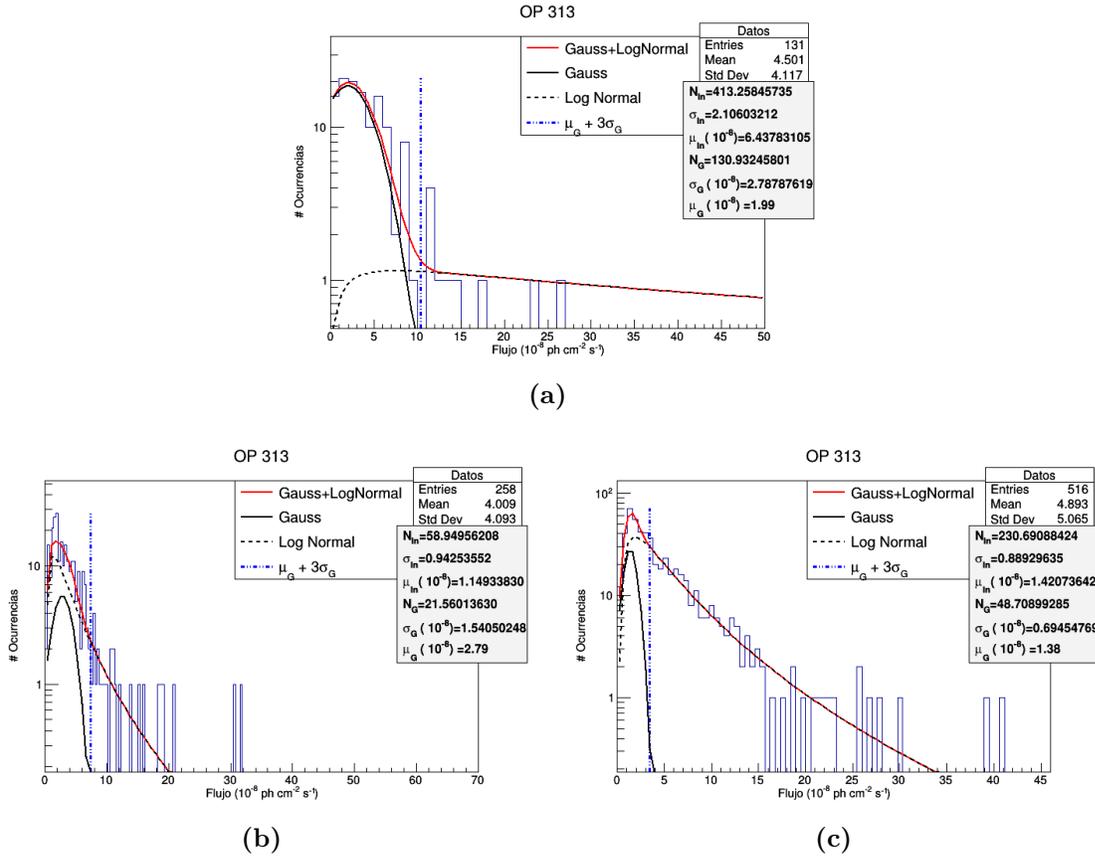


Figura A.10. Histogramas del blazar OP 313 con los 4 episodios temporales sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los histogramas a diferentes episodios temporales: panel (a) 1 mes, (b) 2 semanas y (c) 1 semana.

Ciclo de actividad del criterio Tluczykont para OP 313

Con contribución del modelo EBL

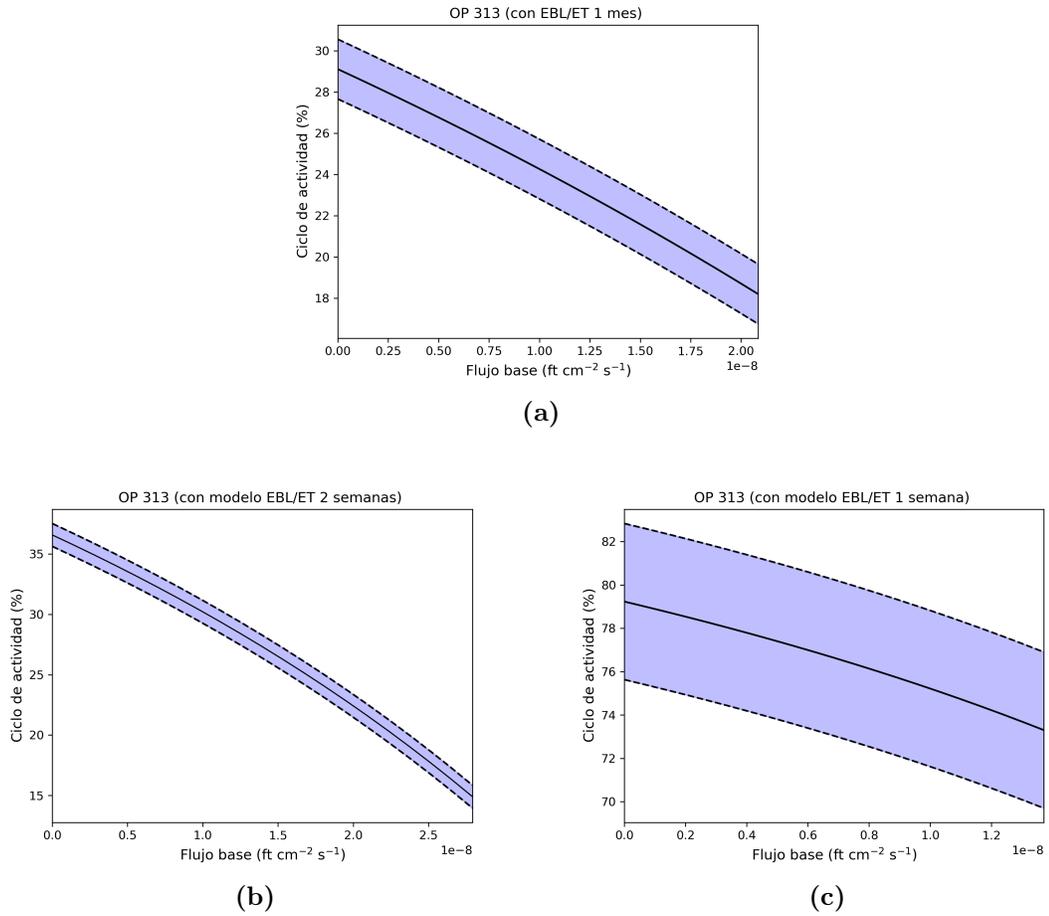


Figura A.11. Ciclos de actividad de OP 313 con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 1 mes, (b) 2 semanas y (c) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

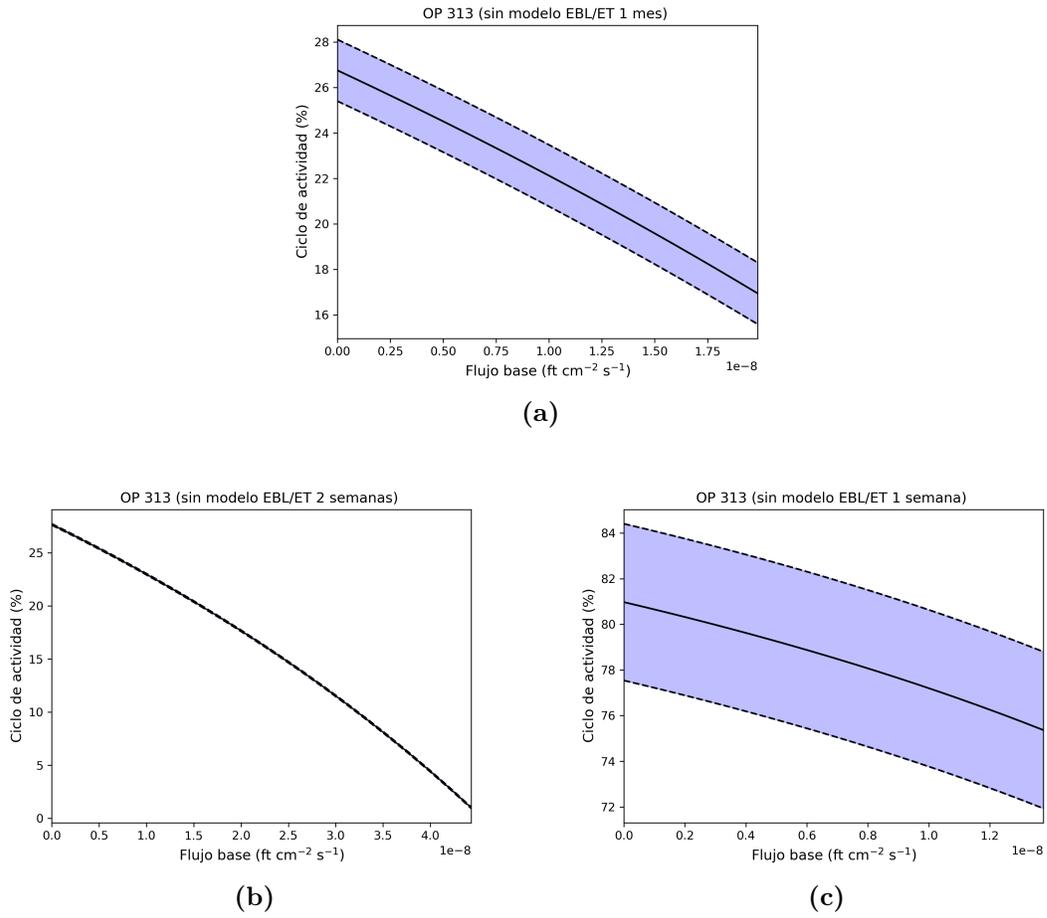


Figura A.12. Ciclos de actividad de OP 313 sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 1 mes, (b) 2 semanas y (c) 1 semana.

A.3.4. Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
3 meses	–	–	–
1 mes	2.09±0.72	9.33±1.26	5.38±0.02
2 semanas	2.79±0.69	7.41±1.08	6.54±0.01
1 semana	1.37±0.17	3.63±0.32	17.85±0.01
Promedio	2.08±0.53	6.79±0.89	9.92±0.01
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
3 meses	4.74±0.31	6.81±1.74	13.95±0.17
1 mes	1.99±0.73	10.35±1.33	3.85±0.01
2 semanas	4.43±7.52	11.81±11.96	2.69±0.01
1 semana	1.38±0.20	3.46±0.40	19.00±0.02
Promedio	3.14±2.19	8.11±3.86	9.87±0.05

Tabla A.8. Tabla de datos del blazar OP 313 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$) del criterio propuesto por Tluczykont, y del ciclo de actividad (DC) con EBL. En la parte inferior se muestran los datos sin EBL.

A.4. 3C 279

Se presentan los histogramas de flujo del blazar 3C 279 con sus ajustes, así como los resultados completos del ciclo de actividad inferido considerando los diferentes tamaños de episodios temporal así como tomando en cuenta la contribución del modelo EBL y sin tomar en cuenta la contribución EBL.

A.4.1. Criterio Vercellone et al. [2004]

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	11.07 \pm 2.01	16.61×10^{-7}	19.04 \pm 0.23
1 mes	10.50 \pm 1.14	15.75×10^{-7}	15.50 \pm 0.06
2 semanas	10.00 \pm 0.85	15.00×10^{-7}	15.83 \pm 0.03
1 semana	9.80 \pm 0.68	14.71×10^{-7}	14.62 \pm 0.01
Promedio	10.34 \pm 1.17	15.51×10^{-7}	16.25 \pm 0.08
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f} \pm \Delta\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$1.5\bar{f}$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	11.10 \pm 2.01	16.65×10^{-7}	19.05 \pm 0.23
1 mes	10.50 \pm 1.15	15.76×10^{-7}	15.50 \pm 0.06
2 semanas	9.99 \pm 0.85	14.98×10^{-7}	15.44 \pm 0.03
1 semana	9.80 \pm 0.68	14.69×10^{-7}	14.62 \pm 0.01
Promedio	10.35 \pm 1.17	15.52×10^{-7}	16.15 \pm 0.08

Tabla A.9. Tabla de valores obtenidos siguiendo el criterio propuesto por Vercellone et al. [2004] para el blazar 3C 279. La parte superior de la tabla muestra resultados obtenidos considerando la contribución de EBL y la parte inferior muestra los resultados sin contribución EBL. Los errores en el valor del umbral ($1.5\bar{f}$) no se muestran pues son los mismos que los errores del flujo base.

A.4.2. Criterio zonas inactivas

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f}_b \pm \Delta\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$1.5\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	5.47 \pm 0.46	8.21×10^{-7}	38.09 \pm 0.46
1 mes	4.86 \pm 0.25	7.28×10^{-7}	38.76 \pm 0.15
2 semanas	4.52 \pm 0.18	6.78×10^{-7}	36.68 \pm 0.07
1 semana	4.25 \pm 0.14	6.38×10^{-7}	36.73 \pm 0.04
Promedio	4.77 \pm 0.26	7.16×10^{-7}	37.57 \pm 0.18
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\bar{f}_b \pm \Delta\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹) $\times 10^{-7}$	$1.5\bar{f}_b$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)	DC $\pm\Delta$ DC (%)
3 meses	5.52 \pm 0.47	8.28×10^{-7}	35.71 \pm 0.43
1 mes	4.84 \pm 0.25	7.26×10^{-7}	37.98 \pm 0.15
2 semanas	4.52 \pm 0.18	6.78×10^{-7}	36.68 \pm 0.07
1 semana	4.26 \pm 0.13	6.39×10^{-7}	36.54 \pm 0.04
Promedio	4.79 \pm 0.26	7.18×10^{-7}	36.73 \pm 0.17

Tabla A.10. En la parte superior de la tabla se muestran los resultados del ciclo de actividad para el criterio de zonas inactivas del blazar 3C 279 con contribución EBL y en la parte inferior de la tabla se muestran los resultados sin contribución EBL. EL error del umbral ($1.5\bar{f}_b$) es el mismo que para el flujo base (\bar{f}_b).

A.4.3. Criterio Tluczykont et al. [2007]

Con modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	–	–	–	–	–
1 mes	–	–	–	–	–
2 semanas	3.36±0.69	9.34±1.21	60.38±4.67	64.91±4.67	55.08±4.67
1 semana	3.60±0.91	11.75±1.83	43.80±2.61	49.06±2.61	37.85±2.61
Promedio	3.48±0.80	10.55±1.52	52.09±3.64	56.99±3.64	46.47±3.64
Sin modelo EBL					
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁸	$\bar{DC} \pm \Delta\bar{DC}$ (%)	$DC_0 \pm \Delta DC_0$ (%)	$DC_\mu \pm \Delta DC_\mu$ (%)
3 meses	4.85±0.85	13.81±1.80	30.50±4.33	36.61±4.33	24.36±4.33
1 mes	–	–	–	–	–
2 semanas	3.47±0.79	8.63±1.72	63.34±4.92	67.89±4.92	57.94±4.92
1 semana	3.19±1.63	14.16±2.88	36.97±2.22	41.33±2.22	32.19±2.22
Promedio	3.84±1.09	12.20±2.13	43.60±3.82	48.61±3.82	38.16±3.82

Tabla A.11. Tabla de datos del blazar 3C 279 usando el criterio propuesto por Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$), del ciclo de actividad promedio (\bar{DC}), del ciclo de actividad en los extremos mínimo (DC_0) y máximo (DC_μ) con contribución EBL y en la parte inferior están los datos sin la contribución EBL.

Histogramas del criterio Tluczykont para 3C 279

Con contribución del modelo EBL

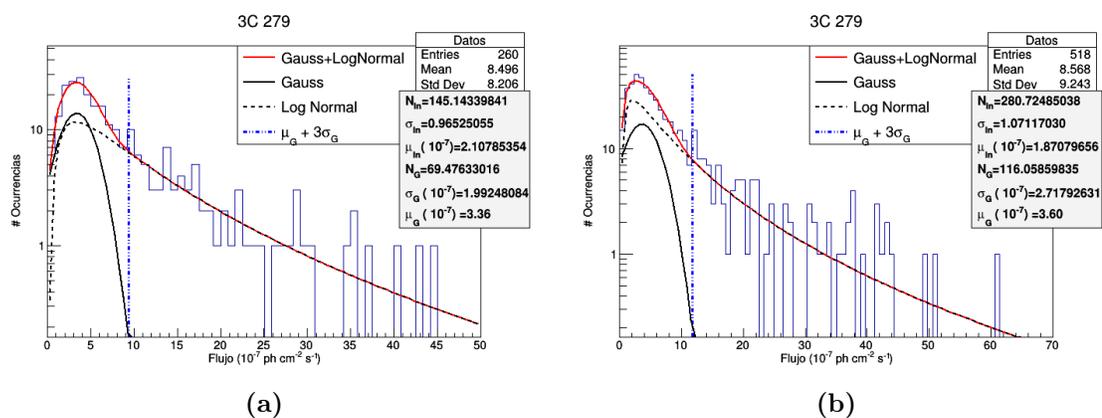


Figura A.13. Histogramas del blazar 3C 279 con 2 episodios temporales con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los histogramas a diferentes episodios temporales: panel (a) 2 semanas y (b) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

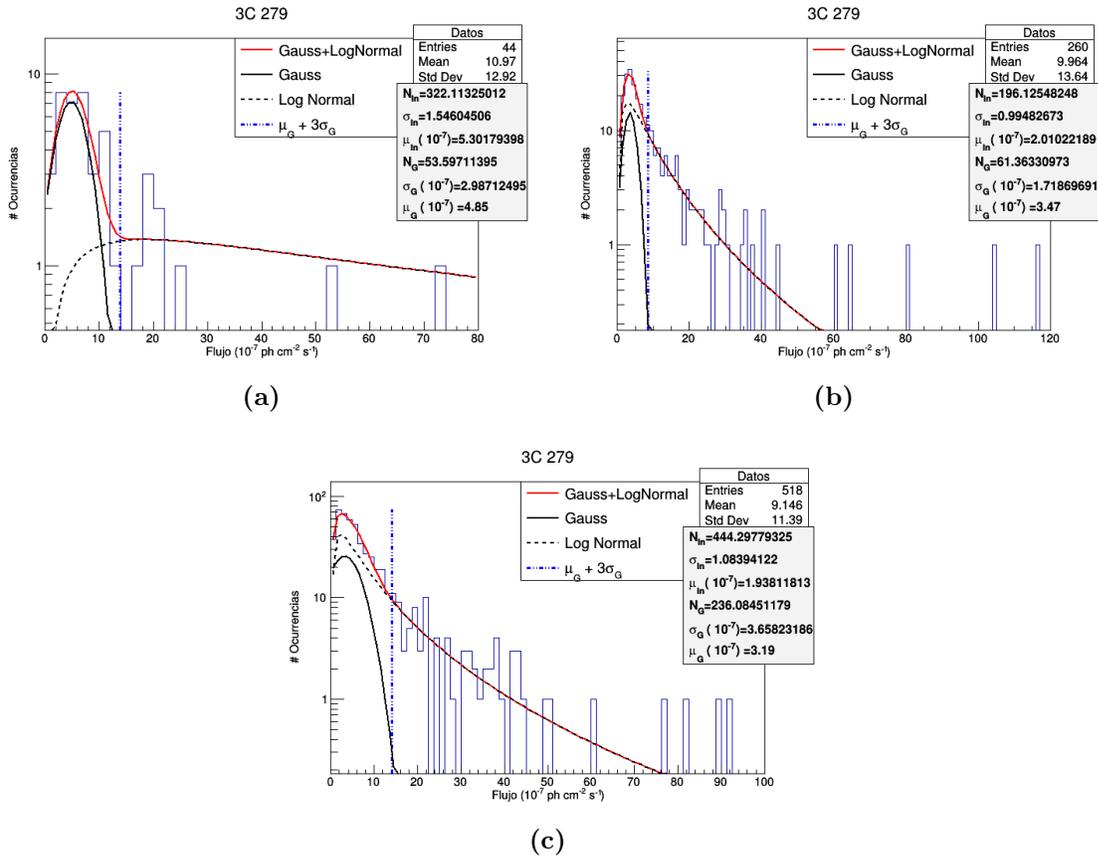


Figura A.14. Histogramas del blazar 3C 279 con 3 episodios temporales sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran histogramas a diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 2 semanas y (c) 1 semana.

Ciclo de actividad del criterio Thuczykont para 3C 279

Con contribución del modelo EBL

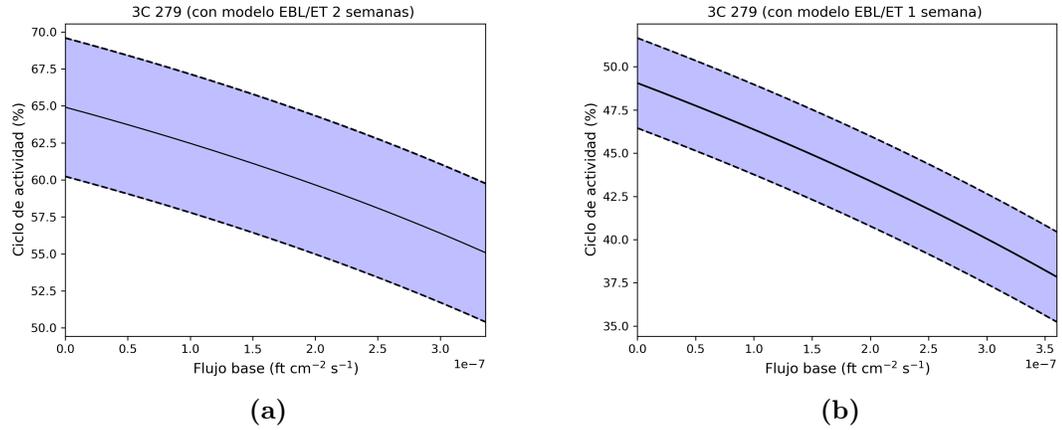


Figura A.15. Ciclos de actividad de 3C 279 con contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 2 semanas y (b) 1 semana.

Sin contribución del modelo EBL

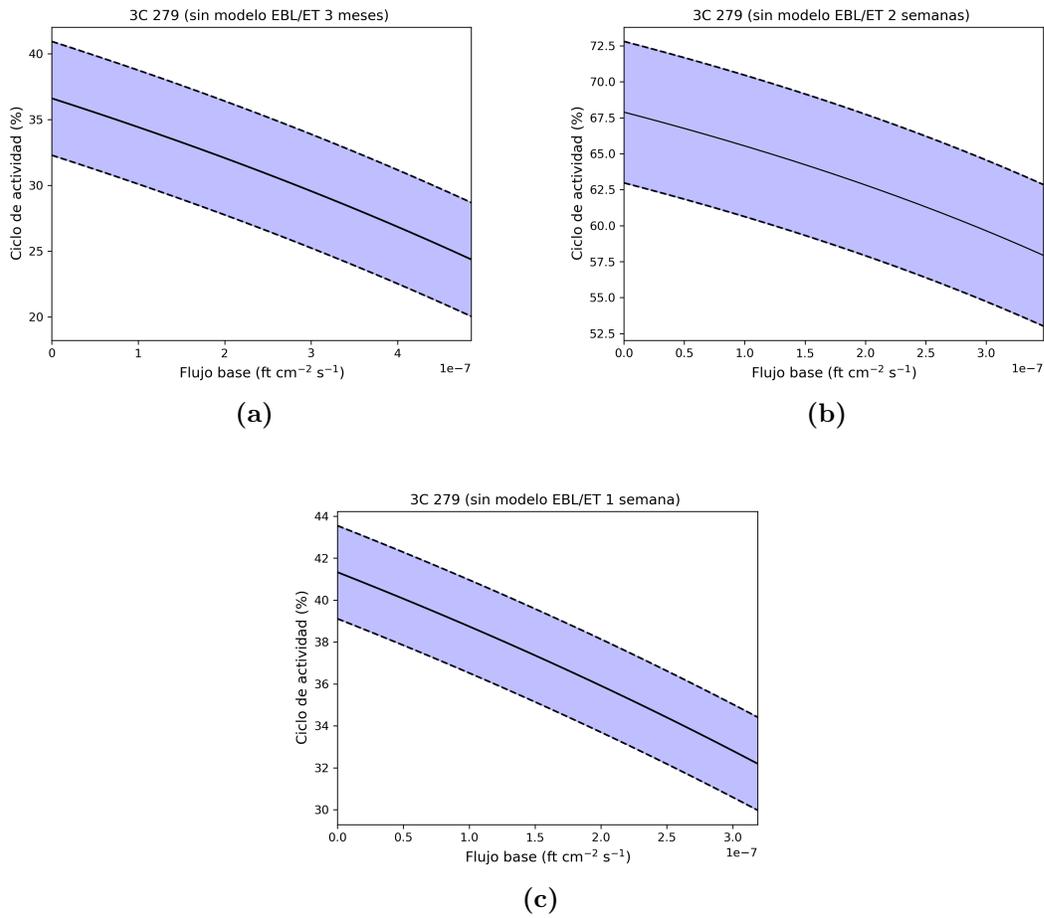


Figura A.16. Ciclos de actividad de 3C 279 sin contribución EBL. Los diferentes paneles muestran los ciclos de actividad considerando diferentes episodios temporales: panel (a) 3 meses, (b) 2 semanas y (c) 1 semana.

A.4.4. Criterio Vercellone et al. [2004] + Tluczykont et al. [2007]

Con modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
3 meses	–	–	–
1 mes	–	–	–
2 semanas	3.36±0.69	9.34±1.21	30.38±0.08
1 semana	3.60±0.91	11.75±1.83	22.46±0.06
Promedio	3.48±0.80	10.55±1.52	26.42±0.07
Sin modelo EBL			
Episodio temporal	$\mu_G \pm \Delta\mu_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	$\mu_G + 3\sigma_G$ (ft cm ⁻² s ⁻¹)×10 ⁻⁷	DC±ΔDC (%)
3 meses	4.85±0.85	13.81±1.80	20.93±0.20
1 mes	–	–	–
2 semanas	3.47±0.79	8.63±1.72	33.46±0.08
1 semana	3.19±1.63	14.16±2.88	16.89±0.06
Promedio	3.84±1.09	12.20±2.13	23.76±0.11

Tabla A.12. Tabla de datos del blazar 3C 279 usando el criterio de la combinación entre Vercellone et al. [2004] y Tluczykont et al. [2007]. En la parte superior de la tabla están los datos del flujo base (μ_G), del umbral ($\mu_G + 3\sigma_G$) del criterio propuesto por Tluczykont, y del ciclo de actividad (DC) con EBL. En la parte inferior se muestran los datos sin EBL.