



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

VARIABILIDAD ESPECTRAL EN LAS BANDAS DEL
ÓPTICO DE UNA MUESTRA DE BLÁZARES-TeV

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

DONALDO EMILIO MORA CHÁVEZ

TUTOR

DRA. ERIKA MARÍA BENÍTEZ LIZAOLA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres, hermanos y amigos
The show must go on...

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutora, la doctora Erika Benítez, quién desde el principio me apoyó, no solo con su experiencia y conocimiento, sino también otorgándome experiencias gratificantes y formativas a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Agradezco a los Dres. David Hiriart, Erika Benítez y José Manuel López por obtener las observaciones en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, así como al Dr. Hiriart por la reducción de los datos.

Gracias también a mi padre y a mi madre, que me han apoyado desde el principio. A mis hermanos que estuvieron en cada momento para sacarme una sonrisa y recordarme porque hago esto. A mi tío Pablo que desde pequeño se preocupó por mí y dejó grandes lecciones en mi vida antes de su partida.

Rodrigo, te agradezco por siempre apoyarme y recordarme constantemente de lo que soy capaz.

Ameyalli, te doy las gracias por siempre estar para mí y recordarme lo importante de la amistad.

Daniel, gracias por los consejos, las pláticas y los desafíos, me inspiraste a ser mejor.

Por último, Junior y Orión, agradezco que siempre me acompañaron y distrajeron cuando el trabajo me sobrepasaba.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) UNAM a través del proyecto PAPIIT IN113320. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Nomenclatura

- **AGN**: Active Galactic Nuclei
- **BL Lac**: Objeto tipo BL Lacerta
- **BWB**: Bluer-when-brighter
- **FSRQ**: Flat Spectrum Radio Quasar
- **HSP**: High-spectral peaked
- **IDV**: Intra Day Variability
- **ISP**: Intermediate-spectral peaked
- **LSP**: Low-spectral peaked
- **LTV**: Long Term Variability
- **Modelos SSC**: Modelos Synchrotron Self-Compton
- **OVV**: Optically Violently Variable Quasars
- **QSO**: Quasi-Stellar Object
- **RL AGN**: Radio-loud AGN
- **RQ AGN**: Radio-quiet AGN
- **RWB**: Redder-when-brighter
- **SED**: Spectral Energy Distribution
- **SMBBH**: Super Massive Binary Black Hole
- **SMBH**: Super Massive Black Hole
- **STV**: Short Term Variability

Resumen

En esta tesis se estudió la variabilidad de flujo y espectral de una muestra de 9 blázares TeV, 5 tipo BL Lac y 4 FSRQ. Estos objetos pertenecen a la familia de los núcleos activos de galaxias o AGN, y se conocen por presentar variabilidad extrema en multifrecuencias. Los datos utilizados en esta tesis, se obtuvieron durante los meses de abril, mayo y junio del 2021, y consisten de observaciones que se procesaron mediante la técnica de fotometría de apertura. La fotometría se realizó con filtros anchos en las bandas B, V, R e I del óptico, del sistema fotométrico de Bessell. Las observaciones se realizaron con el instrumento conocido como Cámara MEXMAN, la cual se acopla al Telescopio de 84cm ubicado en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir. Los datos aquí analizados se publican por primera vez en esta tesis.

Para el análisis de variabilidad se utilizaron datos previamente procesados, necesarios para construir las curvas de luz de las fuentes seleccionadas. Una vez obtenidas las curvas de luz, se hizo un estudio de variabilidad de flujo en los cuatro filtros disponibles y se determinaron la amplitud de variabilidad y la escala mínima de variabilidad para las fuentes que presentaran variabilidad intrínseca, determinada por una prueba de χ^2 . Por otro lado, iniciamos un estudio de variabilidad espectral que consiste en la construcción de la SED con las observaciones cuasi-simultáneas, con las que se observan los cambios en la forma de la SED durante las noches de observación. Posteriormente, se construyeron los diagramas color-magnitud para cada fuente, se utilizaron cuatro índices de color diferentes, B-V, V-R, R-I y B-I, graficados contra el filtro de mayor longitud de onda efectiva usado para calcular el índice de color. Con los diagramas obtenidos se realizó un estudio de correlación, cuyo objetivo es determinar la presencia de comportamientos BWB o RWB en las fuentes. Parte importante del análisis de los datos, fue el desarrollo de códigos en python que permiten automatizar todas las tareas involucradas en este estudio. Todos los códigos desarrollados en esta tesis están disponibles en un repositorio público.

Entre los resultados más relevantes obtenidos de este trabajo se tiene que para seis de las fuentes estudiadas se detectó variabilidad en las curvas de luz, con amplitudes y escalas mínimas diferentes entre ellas, siendo la fuente más variable 3C 279 con una amplitud de variabilidad en el filtro I de 0.58 magnitudes. En general, esto se corresponde con los resultados previos sobre blázares, que los reportan como las fuentes más variables.

Respecto a la variabilidad espectral encontramos que bajo los criterios más estrictos, PKS 1510-089, un blázar tipo FSRQ, presenta un comportamiento RWB y Markarian 501, un objeto tipo BL Lac, presenta un comportamiento BWB. Sin em-

bargo, considerando algunos criterios más laxos respecto a la correlación entre el color y la magnitud tenemos que OJ 287, 3C 273 y BL Lacerta también presentan una débil correlación. BL Lacerta, resulta ser un objeto muy interesante, pues dependiendo del color considerado para el análisis de correlación se encuentra un comportamiento híbrido, i.e. RWB y/o BWB. Estos cinco resultados coinciden con las tendencias reportadas en estudios de grandes muestras de blázares. Por ejemplo, Negi et al. (2022) reportaron que 17.6 por ciento de los FSRQ en su muestra presentan comportamientos RWB, mientras que un 18.5 por ciento de los BL Lac presentaron tendencias BWB.

Aunado a lo anterior, para las nueve fuentes se detectaron variaciones del índice espectral a lo largo de las noches de observación. Sin embargo, solo para tres de los blázares, ON 231, PKS 1510-089 y BL Lacerta, se confirmó que esta variabilidad fuera estadísticamente relevante. Para estas fuentes, la amplitud de variabilidad del índice espectral está entre 0.17 y 2.18.

Con este trabajo se confirman resultados previos sobre el comportamiento RWB o BWB obtenidos en muestras grandes de blázares. Se presentan también resultados recientes de su variabilidad espectral en las bandas del óptico. Finalmente, se desarrollaron códigos específicos en python que permitirán realizar estudios de la variabilidad de índice espectral utilizando grandes muestras de datos de blázares.

Índice general

Agradecimientos	II
Nomenclatura	III
Resumen	IV
1. Introducción	1
1.1. Núcleos Activos de Galaxias	1
1.1.1. Modelo unificado	3
1.2. Fenómeno blázar	4
1.2.1. Jets relativistas	5
1.2.2. Distribución espectral de energía	7
1.3. Variabilidad	8
1.3.1. Variabilidad de color y espectral	10
1.4. Objetivos de la tesis	11
2. Muestra y propiedades multibanda	12
2.1. OJ 287	13
2.2. S4 0954+65	16
2.3. ON 231	16
2.4. 3C 273	17
2.5. 3C 279	21
2.6. PKS 1510-089	23
2.7. DA 406	24
2.8. Markarian 501	26
2.9. BL Lacerta	28
3. Observaciones, curvas de luz y variabilidad	34
3.1. Telescopio de 84 cm	34
3.2. Curvas de luz y variabilidad de flujo	35
3.2.1. Curvas de luz	35
3.2.2. Valores atípicos	36
3.2.3. Magnitudes a flujos	37
3.2.4. Prueba estadística	39
3.2.5. Amplitud y escala de variabilidad	40

3.3. SED, variabilidad de color y espectral	42
3.3.1. Observaciones cuasi-simultáneas y SED con datos del óptico .	43
3.3.2. Diagramas color-magnitud	47
3.3.3. Análisis de correlación	52
3.3.4. Estimación de variabilidad de índice espectral	54
4. Análisis de resultados	61
4.1. Variabilidad de flujo en las curvas de luz	61
4.2. Variabilidad de color y cambios espectrales	76
5. Conclusiones y trabajo futuro	95
5.1. Discusión y conclusiones	95
5.2. Trabajo futuro	99
6. Apéndices	101
6.1. SEDs	101
6.2. Tablas de observaciones	104

Índice de figuras

1.1. Concepción artística del modelo unificado. Crédito a B. Saxton NRAO/AUI/NSF. Obtenida de https://public.nrao.edu/gallery/a-unified-agn-model/	4
1.2. Arriba el espectro en el óptico de BL Lacerta (tomada de Lawrence et al., 1996). Abajo el espectro en el óptico de 3C 273, un FSRQ (tomada de Torrealba et al., 2012).	5
1.3. Espectro esquemático de banda ancha de blázares desde el radio hasta rayos- γ . Tomada de Ulrich et al. (1997).	8
1.4. A la izquierda la SED de PKS 1510-089, un FSRQ. A la derecha la SED de BL Lacerta. Los puntos rojos son las observaciones cuasi-simultáneas de las fuentes, mientras que los puntos grises son observaciones no simultáneas. Tomadas de Abdo et al. (2010b).	9
1.5. Tendencias que indican los comportamientos BWB (en la izquierda) y RWB (en la derecha). Esta descripción es válida para los cuatro colores utilizados.	11
2.1. Ilustración artística del sistema binario presente en OJ 287 (ver Dey et al., 2018).	13
2.2. Mapas VLBA en radio a (a) 23 GHz el 14 de noviembre de 2019 y (b) 43 GHz el 4 de enero de 2020 de OJ 287 en la muestra MOJAVE. Se muestra la forma de la región central a escala de parsecs, en ambas figuras se puede observar la estructura de un jet con diferentes componentes (ver Lister et al., 2018).	14
2.3. Mapa calibrado de identificación del blázar OJ 287 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Se usan las columnas B, V, R, I para calibrar. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/oj287/oj287.html	15
2.4. Imagen de intensidad total el 14 de junio de 2010 en radio a 43 GHz del blázar S4 0954+65 con una ponderación uniforme en escala de parsecs. A0 corresponde al núcleo, mientras que B2-B4 son nudos formados en el jet. (ver Jorstad et al., 2017).	17
2.5. Mapa calibrado de identificación del blázar S4 0954+65 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/s4_0954/s4_0954.html	18

2.6. Imagen de intensidad total el 21 de diciembre de 2012 en radio a 43 GHz del blázar ON 231 con una ponderación uniforme en escala de parsecs. A0 corresponde al núcleo del blázar, mientras que A1 es un nudo que domina la emisión junto con el núcleo y el resto son rasgos que destacan y que forman parte del jet (ver Jorstad et al., 2017). . .	19
2.7. Mapa calibrado de identificación del blázar ON 231 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/on231/on231.html	20
2.8. En (a) se muestra una imagen de la intensidad total de 3C 273 en radio a 22 GHz, con los vectores de polarización superpuestos, época marzo de 1999. La escala gris indica la intensidad linealmente polarizada. G y H forman parte del núcleo, A-F son componentes del jet que sale del núcleo (ver Lister and Smith, 2000). En (b) tenemos el mapa VLBA en radio a 43 GHz de 3C 273, del 4 de enero de 2020. Se observa la estructura del jet del blázar (ver Lister et al., 2018).	21
2.9. Mapa calibrado de identificación del blázar 3C 273 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/3c273/3c273.html	22
2.10. Ilustración de la estructura multibanda del jet en 3C 279 (ver Kim et al., 2020).	23
2.11. Mapas VLBA en radio a (a) 23 GHz el 14 de noviembre de 2019 y (b) 43 GHz el 4 de enero de 2020 de 3C 279 en la muestra MOJAVE. Se observa en ambas figuras la estructura del jet en escala de parsecs. (ver Lister et al., 2018).	24
2.12. Mapa calibrado de identificación del blázar 3C 279 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/3c279/3c279.html	25
2.13. Imagen de intensidad total el 16 de agosto de 2009 en radio a 43 GHz del blázar PKS 1510-089 con una ponderación uniforme. A0 es el núcleo de la fuente, mientras que A1 y A2 son rasgos cuasi-estáticos en el jet. B1 y B2 son nudos que se mueven en el jet (ver Jorstad et al., 2017).	26
2.14. Mapa calibrado de identificación del blázar PKS 1510-089 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/pks1510/pks1510.html	27
2.15. En (a) y (b) se muestran imágenes de la intensidad total de DA 406 en radio a 22 GHz y 43 GHz, respectivamente, en marzo de 1999. S es el núcleo de la fuente, mientras que el resto de componentes corresponden a rasgos del jet (ver Lister and Smith, 2000).	28
2.16. Mapa calibrado de identificación del blázar DA 406 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/da406/da406.html	29

2.17. Imagen de intensidad total en radio a 43 GHz del blázar Markarian 501 en esacala de parsecs, con los vectores de polarización superpuestos, época 1997.40. La escala de gris indica la intensidad linealmente polarizada. S corresponde al núcleo y se observa la estructura del jet (ver Lister and Smith, 2000).	30
2.18. Mapa calibrado de identificación del blázar Markarian 501 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/mkn501/mkn501.html	31
2.19. Mapas VLBA en radio a (a) 23 GHz y (b) 43 GHz de BL Lacerta en la muestra MOJAVE en escala de parsecs. Se observa el núcleo y la estructura de un jet, aunque en escala de kiloparsecs no se observa ningún jet en esta fuente (ver Lister et al., 2018).	32
2.20. Mapa calibrado de identificación del blázar BL Lacerta y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/bllac/bllac.html	33
3.1. Izquierda: Imagen de la cámara <i>MEXMAN</i> montada en el 84cm en el OAN-SPM. Derecha imagen del telescopio posicionado al cenit. Ver https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/instrumentos/imagendirecta/mexman	35
3.2. Este es un ejemplo de lo que se obtiene con el proceso descrito en esta sección. Se observa la SED de ON 231 en las bandas del óptico B, V, R e I, para diferentes épocas de observación, claramente se observa cómo varía dependiendo del MJD, y por tanto, del estado de actividad de la fuente.	43
4.1. Curva de luz de OJ 287 con las observaciones durante los dos meses de observación.	62
4.2. Curvas de luz de OJ 287. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021. Para abril solo se tiene observaciones de una noche.	63
4.3. Curva de luz de S4 0954+65 con las observaciones durante los dos meses de observación.	64
4.4. Curvas de luz de S4 0954+650. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021. Para abril solo se tiene observaciones de una noche.	64
4.5. Curva de luz de ON 231 con las observaciones durante los tres meses de observación.	66
4.6. Curvas de luz de ON 231. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.	66
4.7. Curva de luz de 3C 273 con las observaciones durante los tres meses de observación.	67
4.8. Curvas de luz de 3C 273. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.	68
4.9. Curva de luz de 3C 279 con las observaciones durante los tres meses de observación.	69

4.10. Curvas de luz de 3C 279. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.	70
4.11. Curva de luz de PKS 1510-089 con las observaciones durante los dos meses de observación.	71
4.12. Curvas de luz de PKS 1510-089. Datos obtenidos en (a) mayo 2021, (b) junio 2021.	72
4.13. Curva de luz de DA 406 con las observaciones durante los dos meses de observación.	73
4.14. Curvas de luz de DA 406. Datos obtenidos en (a) mayo 2021, (b) junio 2021.	73
4.15. Curva de luz de Markarian 501 con las observaciones durante los tres meses de observación.	74
4.16. Curvas de luz de Markarian 501. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.	74
4.17. Curva de luz de BL Lacerta. Datos obtenidos en junio 2021	75
4.18. Distribución espectral de energía de 3C 279 para diferentes épocas de observación.	76
4.19. Diagramas color-magnitud para el índice de color B-V para todas las fuentes de la muestra.	78
4.20. Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color B-V para todas las fuentes de la muestra.	80
4.21. Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color B-V para todas las fuentes de la muestra.	81
4.22. Diagramas color-magnitud para el índice de color V-R para todas las fuentes de la muestra.	83
4.23. Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color V-R para todas las fuentes de la muestra.	84
4.24. Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color V-R para todas las fuentes de la muestra.	86
4.25. Diagramas color-magnitud para el índice de color R-I para todas las fuentes de la muestra.	87
4.26. Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color R-I para todas las fuentes de la muestra.	89
4.27. Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color R-I para todas las fuentes de la muestra.	90
4.28. Diagramas color-magnitud para el índice de color B-I para todas las fuentes de la muestra.	91
4.29. Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color B-I para todas las fuentes de la muestra.	92
4.30. Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color B-I para todas las fuentes de la muestra.	94
6.1. Distribución espectral de energía de OJ 287 para diferentes épocas de observación.	101

6.2. Distribución espectral de energía de S4 0954+65 para diferentes épocas de observación.	102
6.3. Distribución espectral de energía de 3C 273 para diferentes épocas de observación.	102
6.4. Distribución espectral de energía de PKS 1510-089 para diferentes épocas de observación.	103
6.5. Distribución espectral de energía de DA 406 para diferentes épocas de observación.	103
6.6. Distribución espectral de energía de Markarian 501 para diferentes épocas de observación.	104
6.7. Distribución espectral de energía de BL Lacerta para la única noche en la que se tienen observaciones en los cuatro filtros.	104

Capítulo 1

Introducción

1.1. Núcleos Activos de Galaxias

Con el descubrimiento de los cuásares apareció una nueva rama en la astrofísica. El nombre es una traducción del término en inglés *quasar*, que a su vez es una contracción de *quasi stellar radio source*, pues al descubrir Schmidt (1963) a 3C 273, notó que la fuente de radio era puntual, es decir, con la apariencia de una estrella, con un corrimiento al rojo alto.¹ Por tanto, 3C 273 fue identificado como un objeto con un gran brillo central, cuasi-estelar y de naturaleza extragaláctica. Fue así que inició el estudio de hoy denominados Quasars (QSO o cuásares).

Los cuásares son parte de la familia de los llamados Núcleos Activos de Galaxias (del inglés, Active Galactic Nuclei, AGN) que se caracterizan por ser fuentes muy energéticas en su parte nuclear. La energía emitida por los AGN no es debida a procesos asociados a la evolución estelar, pues físicamente no se puede reproducir el gran brillo central mediante procesos de emisión térmicos. El modelo más aceptado para explicar la gran energía emitida por estos núcleos galácticos se conoce como modelo estándar. Este modelo propone la existencia de un agujero negro supermasivo (del inglés, Super Massive Black Hole o SMBH) con masas en el rango de $M_{BH} \sim 10^6 - 10^9 M_{\odot}$, ubicado en el centro, el cual acreta material a través de un disco de acreción.

La gran luminosidad central en los AGN tiene su origen en la *acreción*, es decir, es producto de la caída de material galáctico (estrellas, gas y polvo) hacia el SMBH por acción de la gravedad. El material que se encuentra alrededor del agujero negro forma el disco de acreción, el cual rota y se calienta por la disipación viscosa de la energía gravitacional, y entonces emite radiación térmica, principalmente en energías de UV y rayos X (ver Shakura and Sunyaev, 1973; Shakura, 1973; Lynden-Bell, 1969, para el modelo de acreción estándar). El mismo proceso de acreción puede llevar a la formación de *jets* de plasma altamente colimados, los cuales se propagan en una dirección perpendicular al disco de acreción.

Los AGN tienen características muy marcadas que permiten diferenciarlos de otras fuentes extragalácticas. Una de ellas es la alta luminosidad bolométrica (producida

¹3C 273 tiene un $z=0.159$, el cual corresponde a una distancia de 660.8 Mpc o $\sim 2.155 \times 10^9$ años luz, usando $H_0=69.6$, $\Omega_m=0.286$ y $\Omega_{\lambda}=0.714$.

en todas las longitudes de onda) que presentan, en el rango de $10^{42} - 10^{48}$ erg/s⁻¹, que coloca a los AGN entre las fuentes más luminosas del Universo y, por tanto, son visibles a altos corrimientos al rojo. Uno de los QSO más lejanos fue reportado por Wang et al. (2021), que encontraron un corrimiento al rojo $z = 7.642$.

La emisión de los AGNs proviene de regiones muy pequeñas, del orden de miliparsecs, en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, lo que implica densidades de energía altas. El tamaño de las regiones de emisión se deduce de la rápida variabilidad que presentan, en la sección 1.3 se detallará esta idea.

La fenomenología de los AGN muestra que existen distintas clases de objetos (ver por ejemplo la Tabla 1 de Padovani et al., 2017). Entre las clases más conocidas tenemos a:

- **Cuásares:** es la subclase más luminosa de AGN, conocidos en la literatura como QSO, y están considerados entre las fuentes más distantes del Universo. Por definición, un QSO tiene una magnitud en el óptico $M_B < -21.5 + 5 * \log h_{100}$, con $h_{100} = H_0/100$ [km · s⁻¹ · Mpc⁻¹] la constante de Hubble-Lemaître, y se ve como una fuente puntual, es decir, la galaxia huésped no es detectable.
- **Galaxias Seyfert:** son galaxias espirales con un núcleo luminoso. Se dividen en dos subclases, galaxias Seyfert tipo I (Sy I) si muestran líneas anchas y angostas en su espectro, o galaxias Seyfert tipo II (Sy II) si solo se observan líneas angostas (ver Seyfert, 1943).
- **Radiogalaxias:** típicamente están albergadas en galaxias elípticas gigantes, que son muy brillantes en las longitudes de onda del radio. Para esta categoría de AGN es una de las que más subclasificaciones se han desarrollado, por ejemplo, se pueden dividir en radio galaxias FR I y FR II (ver Fanaroff and Riley, 1974), donde las diferencias entre cada clase son (1) la potencia emitida en la radiofrecuencia de 1.4 GHz y (2) la morfología, las galaxias FR II tienen jets muy poderosos y colimados que terminan en puntos calientes rodeados por lóbulos luminosos en radio (*radiolóbulos*), mientras que los jets en las galaxias FR I están muy poco colimados y no muestran radiolóbulos. Por otro lado, hay una clasificación que diferencia entre las galaxias que muestran emisión óptica de línea angosta de alta excitación (HEG) y emisión óptica de línea angosta de baja excitación (LEG) (ver Laing et al., 1994).
- **Blázares:** son AGN brillantes, compactos y muy variables. Suelen mostrar emisión polarizada en frecuencias del radio, óptico, rayos X e incluso rayos- γ . Las variaciones en el flujo total y polarizado van desde menos de un día hasta varios meses. En la sección 1.2 se describirán a detalle las características de los blázares y sus subclases.

Existe otra clasificación que durante muchos años fue una de las más utilizadas para dividir a los AGN en dos tipos, *radio loud AGN* (RL AGN) y *radio quiet AGN* (RQ AGN). Esta clasificación estaba basada en la emisión en radio respecto a la emisión en el óptico de la fuente, un criterio para diferenciar entre estas dos clases es la razón (R_{r-o}) entre los flujos específicos en radio (a 6 cm) y en óptico (a 4400 Å),

donde R_{r-o} está en el rango de 10 a 100 para objetos radio loud y $0.1 < R_{r-o} < 1$ para los radio quiet (ver Kellermann et al., 1989). Aunque esta formulación del criterio deja dudas para los valores de R_{r-o} que están entre 1 y 10.

Sin embargo, Padovani (2016) (ver también Padovani, 2017) ha argumentado efusivamente que la diferencia entre estos dos tipos de AGN no es solo una cuestión de semántica, sino que en realidad las dos clases representan objetos con diferencias intrínsecas; esto es, una gran parte de la energía emitida por los RL AGN es no térmica y está asociada con jets relativistas muy poderosos, mientras que la emisión en las diferentes longitudes de onda de un RQ AGN está dominada por una emisión térmica, que a su vez puede estar relacionada directamente con el disco de acreción. Yendo más allá, ha señalado que las clases «radio-loud/radio-quiet» son obsoletas, engañosas e inapropiadas. Como la principal diferencia física entre estas dos clases es la presencia o ausencia de fuertes jets relativistas, lo que también implica que ambas clases alcanzan energías máximas de fotones muy diferentes (ver su Secc. 2.3), propone el uso de los términos «jetted» y «non-jetted» en lugar de RL y RQ AGN. Esta terminología y clasificación es la que se usará a lo largo de este trabajo.

1.1.1. Modelo unificado

Las diferencias observacionales entre las clases de AGN descritas previamente en realidad dependen del ángulo subtendido entre la fuente y la línea de visión. El modelo unificado asume que el fenómeno AGN tiene un mismo origen físico, i.e. acreción de material hacia un agujero negro central, por lo que explica utilizando argumentos meramente geométricos las distintas clases. El modelo unificado fue propuesto inicialmente por Antonucci (1993). Este modelo, como su nombre lo indica, unifica todos los tipos diferentes de AGN en un modelo estándar en el que el único parámetro físico que varía entre ellos es la potencia intrínseca, mientras que el resto de diferencias observacionales se explican en términos del oscurecimiento o abrillantamiento que varía dependiendo del ángulo que tiene la fuente respecto a la línea de visión del observador, pues dependiendo de este ángulo se observan emisiones de las diferentes componentes del AGN. En la Figura 1.1 se muestra un esquema de este modelo, en el que se pueden observar las componentes de un AGN, que son las que producen un oscurecimiento o abrillantamiento.

En el esquema, la clase blázar correspondería a fuentes tales que el eje del jet se encuentra muy cerca de la línea de visión del observador, es decir, el ángulo formado por la línea de visión y el eje del jet es pequeño, con lo que la emisión del AGN está dominada por el jet que, por efectos relativistas explicados en la sección 1.2.1, hace que la fuente se abrillante.

El modelo unificado ha evolucionado con los nuevos descubrimientos y observaciones, pero la esencia es la misma. Para una revisión más profunda de los avances recientes en construir un modelo unificado que describa mejor a todos los AGN, ver Netzer (2015), donde se hace un resumen de estos hasta el 2015.

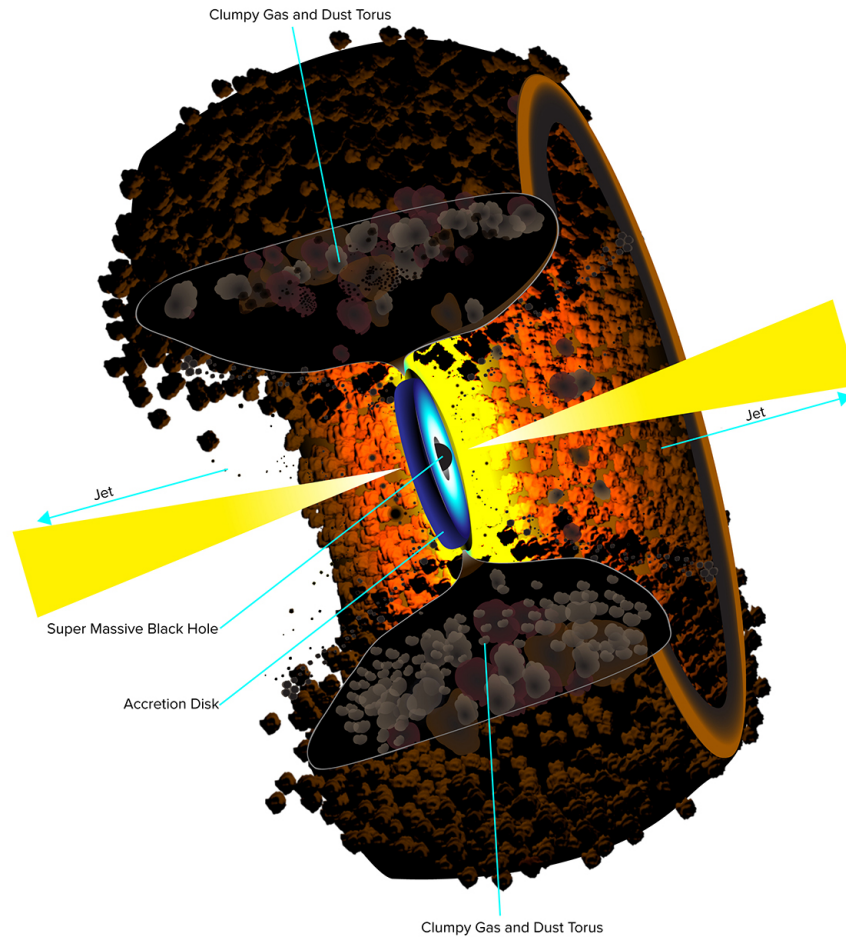


Figura 1.1: Concepción artística del modelo unificado. Crédito a B. Saxton NRAO/AUI/NSF. Obtenida de <https://public.nrao.edu/gallery/a-unified-agn-model/>.

1.2. Fenómeno blázar

El término blázar (*blazar* en inglés) fue propuesto por Ed Spiegel en 1978 como una contracción de los términos: objetos tipo BL Lac y cuásares óptica y violentamente variables (OVV, del inglés *Optically Violently Variable Quasars*) (ver Angel and Stockman, 1980) pues son los nombres que se habían dado originalmente a los dos tipos de objetos que formaban esta clase. Actualmente, la clase blázar está dividida en los objetos tipo BL Lac² y radio-cuásares de espectro plano (FSRQ, por sus siglas en inglés). Ambos tipos de AGN son potentes emisores en radiofrecuencias, pues al ser jetted QSOs poseen jets con fuertes emisiones en radio. Sin embargo, emiten radiación en todas las bandas del espectro electromagnético, desde el radio hasta rayos-X, y en algunos casos hasta rayos- γ . Esta emisión, además, presenta las

²Nombre dado a los objetos con propiedades similares a las del blázar BL Lacerta, que inicialmente fue catalogado como estrella variable en la constelación de Lacerta.

variaciones más rápidas y violentas de todos los AGN (ver por ejemplo Angel and Stockman, 1980). Los objetos tipo BL Lac se caracterizan por espectros en el óptico con líneas de emisión muy débiles o con ausencia de estas, presentan además bajas tasas de acreción y discos que son radiativamente ineficientes. Por otro lado, los FSRQ presentan fuertes líneas de emisión en el óptico, son más luminosos y con tasas de acreción altas (ver por ejemplo Costamante, 2012, y las referencias ahí citadas). En la Figura 1.2 se muestran los espectros en el óptico de un blázar tipo BL Lac y un FSRQ, en las que se pueden observar dichos comportamientos.

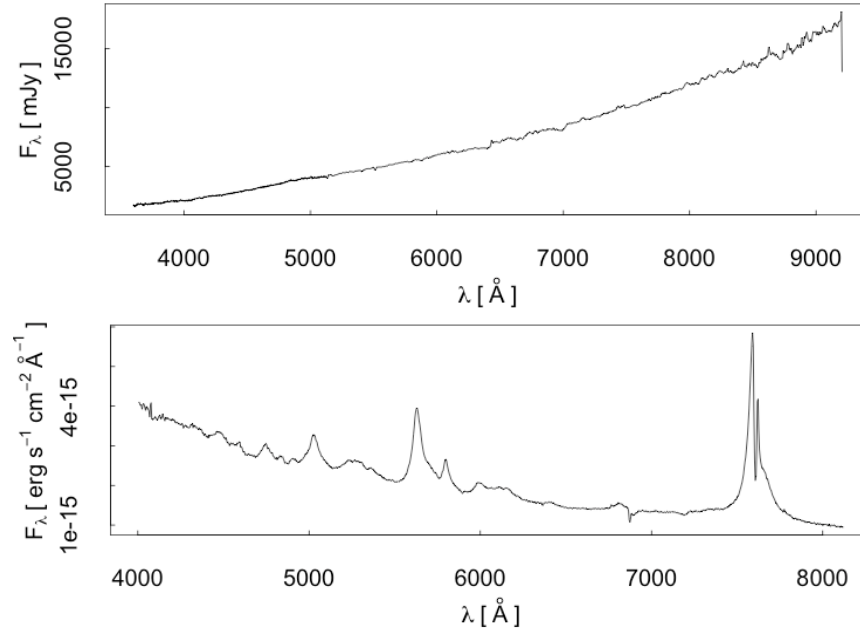


Figura 1.2: Arriba el espectro en el óptico de BL Lacerta (tomada de Lawrence et al., 1996). Abajo el espectro en el óptico de 3C 273, un FSRQ (tomada de Torrealba et al., 2012).

1.2.1. Jets relativistas

El estudio de los jets es vital para entender y describir el comportamiento de los blázares pues representan su principal fuente de emisión. Podemos definir a los jets astrofísicos como flujos colimados de partículas y campos (ver Romero, 2021). Para el caso particular de jets relativistas en AGN podemos considerarlos como flujos altamente colimados que emergen del SMBH o, más en general, del motor central del AGN. Además, transportan energía y momento del motor central a ubicaciones alejadas de este (Boettcher et al., 2012).

Actualmente se sabe que los jets relativistas pueden emitir en todas las bandas del espectro electromagnético, desde el radio hasta rayos-X, y en algunos blázares, como los estudiados en este trabajo, hasta rayos- γ . Uno de los fenómenos que originan parte de esta radiación, en particular en las bandas de baja energía (de radio a óptico/UV), es la radiación por sincrotrón, es decir, la radiación que resulta por la aceleración

de partículas cargadas que siguen trayectorias helicoidales alrededor de las líneas del campo magnético presente en el jet. Mientras que para la radiación de alta energía se han propuesto diferentes modelos, uno de los más aceptados es el que explica esta emisión de alta energía como resultado de un efecto Compton inverso que sufren los electrones en el jet por los fotones generados por la radiación sincrotrón, de aquí que a este modelo se le conozca como *synchrotron self-Compton* (SSC).

Para que los modelos anteriores coincidan con las observaciones que se tienen de estos objetos, en particular las emisiones de alta energía, es necesario que las partículas que originan esta radiación estén moviéndose a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, es decir, velocidades relativistas, de ahí el nombre. Es por esto que los efectos relativistas tienen un papel muy importante al realizar estudios de estos objetos y es necesario conocer las repercusiones que tienen en las observaciones realizadas. Los tres efectos más relevantes son la *aberración relativista*, el *Doppler boosting* y los *movimientos superlumínicos*.

La aberración relativista, consiste en el «enfocamiento» (beaming en inglés) de la radiación emitida por una fuente que se mueve con velocidad relativista, esto es, un observador que ve una fuente con una emisión isotrópica, que se mueve a una velocidad cercana a la de la luz, verá que la mitad de la emisión se concentrará en un cono con un ángulo de apertura $1/\Gamma$ que va en la dirección de movimiento de la fuente, con Γ el factor de Lorentz de la región de emisión. Este efecto, combinado con la contracción de la longitud y los efectos del tiempo de viaje de la luz, dan origen a la rotación de Penrose, que es una distorsión en la forma geométrica observada de un objeto que se mueve a velocidad relativista, lo que lleva a una apariencia rotada del objeto (ver Boettcher et al., 2012)..

El Doppler boosting, o «abrillantamiento Doppler», es resultado de las transformaciones relativistas entre un marco de referencia situado en la fuente que se mueve a velocidad relativista (que llamaremos *em*) y el marco en reposo de un observador (que llamaremos *rec*). Partiendo de los 4-vectores de velocidad y momento, y considerando la invarianza del producto escalar en la teoría de la relatividad, se encuentra que la energía que mide el observador en su marco de referencia es diferente de la energía emitida por la fuente en su marco de referencia, la relación entre estas dos es

$$E^{rec} = \frac{E^{em}}{\Gamma(1 - \beta_{\Gamma} \cos \theta)}, \quad (1.1)$$

donde Γ es el factor de Lorentz ($\Gamma = [1 - \beta_{\Gamma}^2]^{-1/2}$), β_{Γ} es la velocidad de la región de emisión, normalizada por la velocidad de la luz, y θ es el ángulo de visión del observador. El factor $\delta = [\Gamma(1 - \beta_{\Gamma} \cos \theta)]^{-1}$ es llamado el factor Doppler y tiene gran relevancia en el estudio de blázares, pues a partir de este se puede aproximar el tamaño de la región de emisión, como veremos en la sección de variabilidad. Además que aparece constantemente en las transformaciones de cantidades físicas entre los marcos de referencia definidos previamente. Es importante notar que el factor Doppler depende de la velocidad a la que se mueve la región de emisión en el jet, pero también del ángulo que el jet forma con la línea de visión, en particular, entre menor sea el ángulo este efecto será más notorio.

Al considerar los cambios en el flujo en una frecuencia dada, que es lo que determina qué tanto brilla una fuente, aparecerá un factor extra en las ecuaciones de transformación pues no solo el flujo tiene una transformación, también en la frecuencia hay un cambio al pasar de un marco de referencia a otro. Considerando este efecto, y suponiendo que la fuente emite, en su marco de referencia, siguiendo una ley de potencias de la forma $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ tendremos que el flujo que el observador mide (F^{rec}) es

$$F^{rec} = F^{em} \delta^{3+\alpha}, \quad (1.2)$$

donde F^{em} es el flujo emitido por la fuente en la misma frecuencia que en la que el observador mide el flujo en su marco de referencia (ver Boettcher et al., 2012).

En el caso de los jets en los blázares ocurre que el jet que apunta cercano a la dirección del observador se ve abrigado, mientras que el que apunta alejándose del observador se verá opacado. Es por esto que en los blázares observados es más común encontrar una estructura con un solo jet saliendo de la región central.

Finalmente, los movimientos superlumínicos, como su nombre lo indica, son movimientos aparentes de las fuentes emisoras con velocidades mayores a la velocidad de la luz. En los jets relativistas estos se observan en los nudos que viajan a través de este. Se han reportado velocidades aparentes de hasta 50 veces la velocidad de la luz. Este efecto, al igual que los anteriores, depende de la velocidad a la que se mueve la región de emisión y el ángulo de visión. La velocidad aparente, en el plano perpendicular a la línea de visión, que se observa para una región de emisión que se mueve con una velocidad β_Γ formando un ángulo θ con la línea de visión del observador está dada por

$$v_{\perp,app} = \frac{c\beta_\Gamma \sin \theta}{1 - \beta_\Gamma \cos \theta}, \quad (1.3)$$

con Γ el factor de Lorentz correspondiente. Medir las velocidades aparentes también es una herramienta útil para estimar ángulos de visión y factores Lorentz, con lo que se tiene más información del jet y las regiones de emisión (ver Boettcher et al., 2012).

1.2.2. Distribución espectral de energía

La distribución espectral de energía (SED) de los AGNs es una herramienta poderosa al estudiarlos. Por un lado, permite caracterizar la emisión de estos objetos en todo el espectro electromagnético, o bandas específicas del mismo. También es útil para distinguir las contribuciones al flujo de las diferentes componentes del AGN, así como distinguir los tipos de AGN cuya emisión es dominada por el jet de los que no. Para obtener la SED de cualquier fuente es necesario contar con observaciones simultáneas y en multifrecuencias.

En el caso particular de los blázares, desde hace más de 20 años se ha establecido que tienen una SED que presenta dos máximos en el flujo ubicados a distintas frecuencias, ver Figura 1.3. Con base en la ubicación del primer máximo se definió una nueva clasificación en los blázares. Originalmente esta clasificación era exclusiva para objetos tipo BL Lac, por lo que varios autores utilizan los acrónimos HBL y LBL (del inglés high-energy y low-energy cutoff BL Lacs, respectivamente) (ver Padovani

and Giommi, 1995), sin embargo, esta clasificación se extendió a todos los blázares para pasar a los acrónimos HSP y LSP (del inglés high y low synchrotron peaked, respectivamente), pues la radiación sincrotrón es el modelo más aceptado para describir la emisión de baja energía de los blázares, que da lugar a la primer joroba en la SED de estas fuentes. Posteriormente se incorporaron los blázares ISP (del inglés intermediate synchrotron peaked) como una clase intermedia entre las existentes (ver Nieppola et al., 2006).

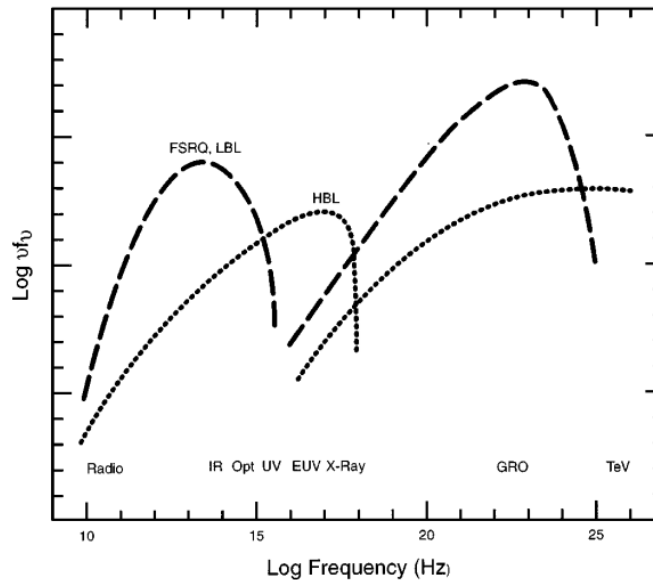


Figura 1.3: Espectro esquemático de banda ancha de blázares desde el radio hasta rayos- γ . Tomada de Ulrich et al. (1997).

En general, la SED de un FSRQ difiere mucho de la de un blázar tipo BL Lac. Ver por ejemplo la Figura 1.4, en la que se muestran las SED de un FSRQ, PKS 1510-089, y BL Lacerta. Claramente el pico de baja energía de BL Lacerta ocurre a una frecuencia mayor y alcanza un valor mayor de flujo que en el caso del FSRQ. Mientras que para las bandas de alta energía el FSRQ alcanza flujos mayores que BL Lacerta. Estas tendencias se encuentran en general para esta clasificación, no obstante, hay excepciones a estos comportamientos. Abdo et al. (2010b) realizaron un avance muy grande en este sentido, pues obtuvieron las SEDs de un gran número de blázares observados por Fermi. Entre su muestra hay tanto BL Lacs como FSRQ.

1.3. Variabilidad

Estudiar las variaciones que se presentan en los blázares es de gran importancia pues proporcionan información sobre las regiones más cercanas al motor central de estos y la física que las gobierna (ver Benítez, 1997). Las escalas de tiempo, los cambios espectrales, y las correlaciones y retrasos entre variaciones en diferentes componentes

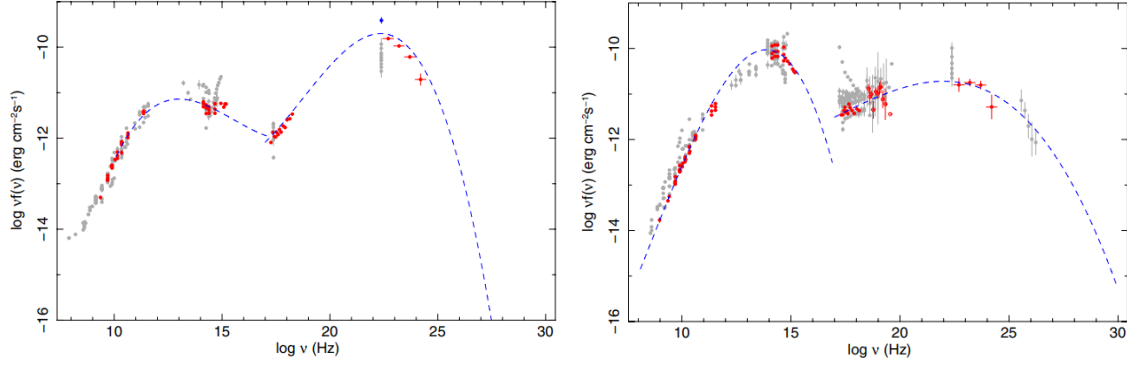


Figura 1.4: A la izquierda la SED de PKS 1510-089, un FSRQ. A la derecha la SED de BL Lacerta. Los puntos rojos son las observaciones cuasi-simultáneas de las fuentes, mientras que los puntos grises son observaciones no simultáneas. Tomadas de Abdo et al. (2010b).

proveen información crucial sobre la naturaleza y ubicación de estas componentes así como sus interdependencias (Ulrich et al., 1997).

Por ejemplo, es posible obtener una cota superior para el tamaño de la región de emisión a partir de la escala mínima de variabilidad. Si consideramos una región de emisión, cuya escala de tamaño característica es R , sabemos que a los fotones, en el marco de referencia de la región de emisión (em), les tomará un tiempo $\Delta t^{em} \sim R/c$ atravesar la región de emisión, suponiendo que es transparente a dichos fotones. Si esta fuente se mueve a una velocidad relativista, el tiempo en el marco de referencia em sufrirá una contracción de forma que el intervalo en el marco de referencia del observador (rec) será $\Delta t^{rec} = \Delta t^{em}/\delta$. De modo que la escala mínima de variabilidad que se puede esperar de una fuente de tamaño R , con un movimiento relativista, es $\Delta t_{var,min}^{rec} \geq \delta^{-1} R/c$. Así que si se observa variabilidad en una escala de tiempo Δt_{var}^{obs} , tendremos una restricción en el tamaño de la región de emisión $R \leq c \Delta t_{var}^{obs} \delta$ (ver Boettcher et al., 2012).

La variabilidad en los blázares se puede clasificar en variabilidad intradía (IDV) con escalas de tiempo de variación menores a un día, variabilidad de corto plazo (STV) con escalas que van desde días a unos pocos meses y variabilidad de largo plazo (LTV) con escalas que abarcan desde varios meses hasta años. La STV en el óptico es útil para explorar variaciones de flujo, de color y espectrales y puede ser de ayuda para separar las componentes de emisión cuasi-térmicas (como el disco de acreción) de las no térmicas (ver por ejemplo Agarwal et al., 2016; Gaur et al., 2012).

Se ha encontrado que los estudios de variabilidad en multifrecuencias realizados en los blázares permiten 1) conocer el estado de actividad de la fuente, 2) buscar posibles correlaciones entre eventos que ocurren en altas y bajas energías, y 3) caracterizar la SED. La meta final de los estudios de variabilidad en blázares es entender la estructura y el estado físico del plasma en el jet, es decir, la geometría, aceleración y los procesos de radiación.

La mayoría de los blázares varían considerablemente en escalas de tiempo muy cortas (horas o días), al menos en las bandas del óptico a rayos- γ . Por esto es que es

necesario dedicar esfuerzos en obtener observaciones frecuentes y continuas, cuando sea posible, en diferentes longitudes de onda. Con esto, además, es posible identificar destellos o explosiones en las fuentes, y estudiar cómo se perciben estos eventos en las diferentes longitudes de onda.

Los mecanismos para explicar la variabilidad en los blázares involucran esencialmente dos posibilidades, la primera son ondas de choque que se mueven a lo largo del jet, y la segunda es la rotación del cono de enfocamiento³ (beaming cone) alrededor de la línea de visión; ambos podrían ser relevantes en momentos diferentes o para diferentes fuentes. Para el primer caso se esperan variaciones espectrales, mientras que en el segundo se pueden producir variaciones acromáticas, es decir, en las que la variación para cada frecuencia es independiente de las variaciones en otras bandas (ver Marscher, 1996; Dreissigacker and Camenzind, 1996, para los modelos físicos).

1.3.1. Variabilidad de color y espectral

La variabilidad de los índices de color, asociada con la variabilidad espectral en el óptico, nos da pistas para investigar los mecanismos de variabilidad en blázares y para buscar una relación básica entre sus muchas subclases. Los estudios de variabilidad espectral hacen parecer que los blázares son más variables en longitudes de onda menores que el pico de la emisión sincrotrón, con una amplitud que aumenta al disminuir la longitud de onda (ver Ulrich et al., 1997, y las referencias ahí citadas).

La herramienta usual para realizar los estudios de color son los diagramas color-magnitud. En estos se puede observar cómo se relaciona el índice de color con la magnitud de la fuente, es decir, su estado de actividad. De estos diagramas nos interesa la correlación entre estas cantidades. En particular, si tomamos colores tales que el filtro de mayor longitud de onda se resta del de menor podemos distinguir un comportamiento *bluer when brighter* (BWB) cuando se tiene una correlación positiva y un comportamiento *redder when brighter* (RWB) cuando se tiene una correlación negativa. Esto es, un comportamiento BWB se muestra cuando a mayor brillo (menor magnitud) el color en cuestión es menor, mientras que la tendencia RWB ocurre cuando a mayor brillo el color es mayor, o sea, más rojo (ver Figura 1.5).

Una propuesta para explicar las variaciones de color de largo plazo es la superposición de un color rojo y una componente azul subyacente (por ejemplo Isler et al., 2017; Bonning et al., 2012, y las referencias ahí presentadas). Para un comportamiento BWB, la emisión sincrotrón del jet relativista podría dar la contribución roja, mientras que la componente azul subyacente se puede atribuir a la emisión térmica del disco de acreción. La tendencia RWB probablemente es debida a una fuerte y azul contribución del disco de acreción mezclada con la emisión más roja del jet, y las variaciones acromáticas observadas en los blázares pueden estar asociadas con diferentes componentes del jet volviéndose más relevantes para la emisión en diferentes intervalos de tiempo (Bonning et al., 2012). Las variaciones de color también se pueden entender dentro de un marco general propuesto por Isler et al. (2017), donde las transiciones de un sistema dominado por el disco, a una contribución mixta, y a

³Refiriéndose al cono que resulta de la aberración relativista.

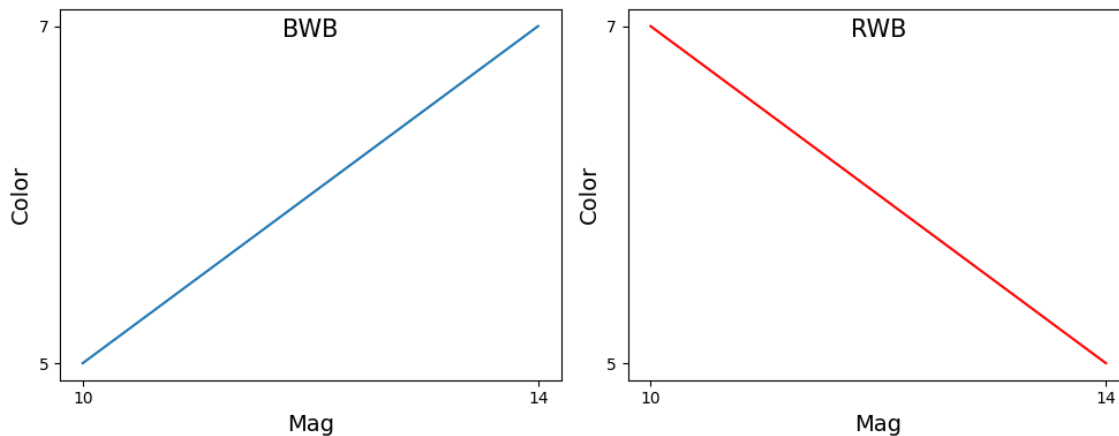


Figura 1.5: Tendencias que indican los comportamientos BWB (en la izquierda) y RWB (en la derecha). Esta descripción es válida para los cuatro colores utilizados.

uno dominado por el jet pueden guiar el cambio en los comportamientos del color de la fuente en diferentes periodos.

Los complicados comportamientos en los colores, asociados con los más complejos mecanismos de emisión, parecen ser una característica recurrente en los blázares. Incluso para un solo objeto es posible encontrar diferentes comportamientos para diferentes periodos de observación, probablemente esto se deba al mecanismo intrínseco de emisión y/o a algún tipo de sesgo de selección, como diferentes estados de actividad, muestreos temporales y episodios explosivos en blázares específicos (Li et al., 2018).

1.4. Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta tesis es estudiar la variabilidad de flujo, de color y espectral en una muestra de blázares-TeV mediante observaciones de fotometría de apertura en las bandas B, V, R e I del sistema fotométrico de Bessel en las bandas del óptico, realizadas con la cámara *MEXMAN* acoplada al Telescopio de 84 cm del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir durante los meses de abril, mayo y junio del 2021. Esto siguiendo cuatro objetivos específicos:

1. Determinar la presencia de variaciones en el flujo de las fuentes en los cuatro filtros disponibles y determinar escalas características del fenómeno de variabilidad;
2. Establecer correlaciones entre índices de color y el estado de actividad de las fuentes para determinar comportamientos BWB o RWB;
3. Estudiar las variaciones del índice espectral en diferentes bandas del óptico;
4. Desarrollar códigos en python para automatizar procesos recurrentes en estudios de variabilidad para utilizarlos y agilizar estudios futuros.

Capítulo 2

Muestra y propiedades multibanda

Para este trabajo, hemos seleccionado una muestra de nueve blázares-TeV, es decir, emisores de rayos gamma en las bandas de los Tera eV. La selección de la muestra se hizo con base en los blázares del proyecto *Monitoreo fotopolarimétrico de larga base de tiempo de blázares TeV*¹ que son visibles en los meses de abril, mayo y junio.

En la Tabla 2.1 presentamos sus nombres más conocidos en la columna (1), sus coordenadas: ascensión recta y declinación en las columnas (2) y (3), respectivamente, su corrimiento al rojo, z , en la columna (4), el tipo de blázar en la columna (5) y también su clasificación de acuerdo a la ubicación del máximo pico de emisión sincrotrón en la columna (6). Por lo que, estudiaremos cinco blázares tipo BL Lac y cuatro FSRQ.

Tabla 2.1: Muestra de blázares observadas con la cámara *MEXMAN* montada en el telescopio de 84cm ubicado en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir.

Nombre	R.A (J2000) hh:mm:ss	Dec (J2000) dd:mm:ss	Redshift	Tipo	Peak
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
OJ 287	08:54:48.875	+20:06:30.641	0.306	BL Lac	LSP
S4 0954+650	09:58:47.245	+65:33:54.818	0.3694	BL Lac	LSP
ON 231 (W Comae)	12:21:31.691	+28:13:58.500	0.102	BL Lac	ISP
3C 273	12:29:6.700	+02:03:8.598	0.1576	FSRQ	LSP
3C 279	12:56:11.167	-05:47:21.525	0.536	FSRQ	LSP
PKS 1510-089	15:12:50.533	-09:05:59.830	0.36	FSRQ	LSP
DA 406	16:13:41.064	+34:12:47.909	1.4	FSRQ	LSP
Markarian 501	16:53:52.217	+39:45:36.609	0.0337	BL Lac	HSP
BL Lacerta	22:02:43.291	+42:16:39.980	0.0686	BL Lac	LSP

A continuación se hace una descripción con más detalle de las propiedades importantes de cada una de las fuentes, se muestran además los mapas calibrados de

¹<https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/>

identificación, detalles del jet e información relevante sobre estudios de variabilidad espectral y de flujo realizados previamente.

2.1. OJ 287

OJ 287 es un objeto tipo BL Lac ($z = 0.306$; Stickel et al., 1989) y es uno de los blázares más estudiados, ya que presenta estallidos cuasi-periódicos en el óptico en intervalos de alrededor de 12 años (ver Sillanpää et al., 1988; Zhao et al., 2022). Estos estallidos parecen venir en pares con separación entre ellos de uno a dos años y se sugiere que esto es debido a la presencia de un sistema binario de agujeros negros super masivos (SMBBH) en el centro del blázar (p. ej. Sillanpää et al., 1988). En la Figura 2.1 se muestra una representación artística del sistema binario presente en OJ 287. Bajo este modelo, se explican los dos estallidos como resultado del agujero negro secundario atravesando el disco de acreción del agujero negro primario. El hecho de presentar un sistema SMBBH es por si mismo interesante, y es otra de las razones por las que este objeto es ampliamente estudiado. Además de ser el primer sistema de este estilo en ser observado.

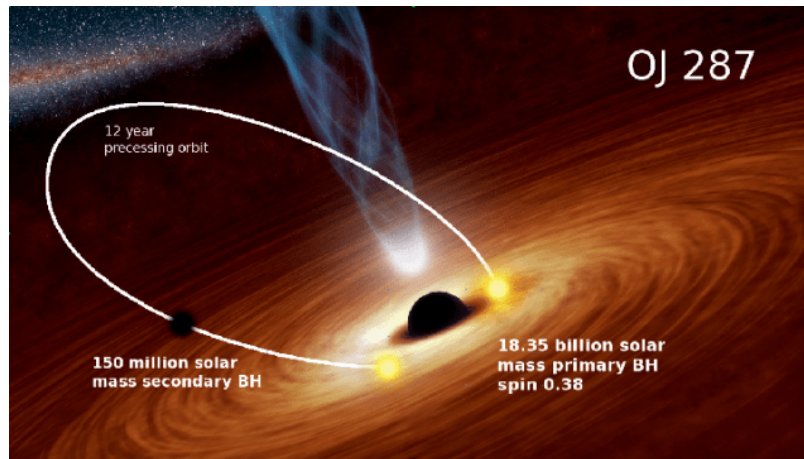


Figura 2.1: Ilustración artística del sistema binario presente en OJ 287 (ver Dey et al., 2018).

Para describir el comportamiento de OJ 287 con el modelo de agujeros negros binarios, los parámetros orbitales que ajustan mejor corresponden a una masa del agujero negro primario: $M = 1.84 \times 10^{10} M_{\odot}$, y una masa del agujero negro secundario: $m = 1.30 \times 10^8 M_{\odot}$ (ver Nilsson et al., 2020).

Otro detalle observacional relevante de OJ 287 es que se ha encontrado que el ángulo de posición del jet, en escala de parsecs, se «tambalea», es decir, presenta oscilaciones en el ángulo de posición del jet de $\sim 40^{\circ}$ (p. ej. Agudo et al., 2012; Britzen et al., 2018). Estos cambios en el ángulo de posición también pueden ser explicados por el modelo SMBBH, ya sea por la evolución del espín del BH primario o por la precesión de la dirección del momento angular de la región interna del disco de acreción (p. ej. Dey et al., 2021).

Respecto a su actividad en el óptico se han realizado estudios que han llevado a diferentes conclusiones respecto a la variabilidad de flujo. Por ejemplo, Gupta et al. (2019) realizaron un estudio fotométrico en las bandas BVRI en el cuál, para las noches con observaciones cuasi-simultáneas disponibles, no se encontró variabilidad intra-día en el flujo ni en el color, pero sí se encontraron grandes variaciones con respecto al tiempo a escalas temporales mayores.

Por otro lado, Yuan et al. (2021) encontraron la presencia de IDV para algunas noches en las curvas de luz con diferentes filtros, además de reportar un posible periodo intra-día de alrededor de 94 min el 10 de diciembre de 2017. Igualmente, en un periodo de observación anterior, y durante un outburst (estallido), Gupta et al. (2017) encontraron que para algunas noches OJ 287 presentaba IDV y para algunas otras no.

Respecto al comportamiento espectral de la fuente al compararla con el estado de actividad se han reportado tendencias BWB en diferentes épocas (p.ej. Zhang et al., 2022; Yuan et al., 2021; Gupta et al., 2019; Dai et al., 2011), también se han reportado comportamientos RWB y BWB (p. ej. Bonning et al., 2012), y han habido estudios en los que no se encuentra ningún comportamiento definido para la variación espectral de la fuente (p. ej. Gupta et al., 2017; Siejkowski and Wierzcholska, 2017; Negi et al., 2022).

En las Figuras 2.2 y 2.3 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente.

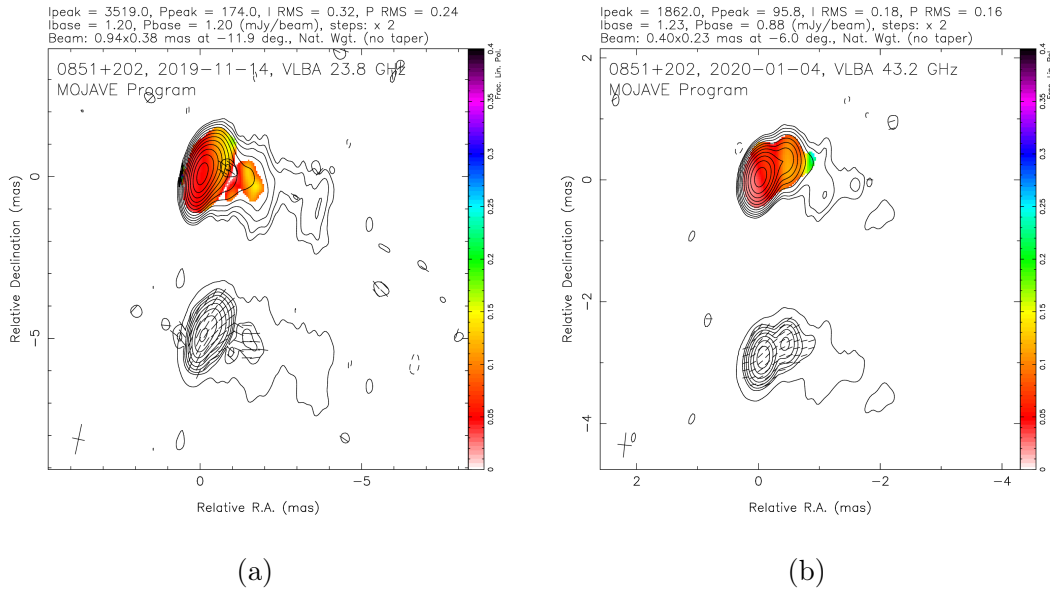


Figura 2.2: Mapas VLBA en radio a (a) 23 GHz el 14 de noviembre de 2019 y (b) 43 GHz el 4 de enero de 2020 de OJ 287 en la muestra MOJAVE. Se muestra la forma de la región central a escala de parsecs, en ambas figuras se puede observar la estructura de un jet con diferentes componentes (ver Lister et al., 2018).

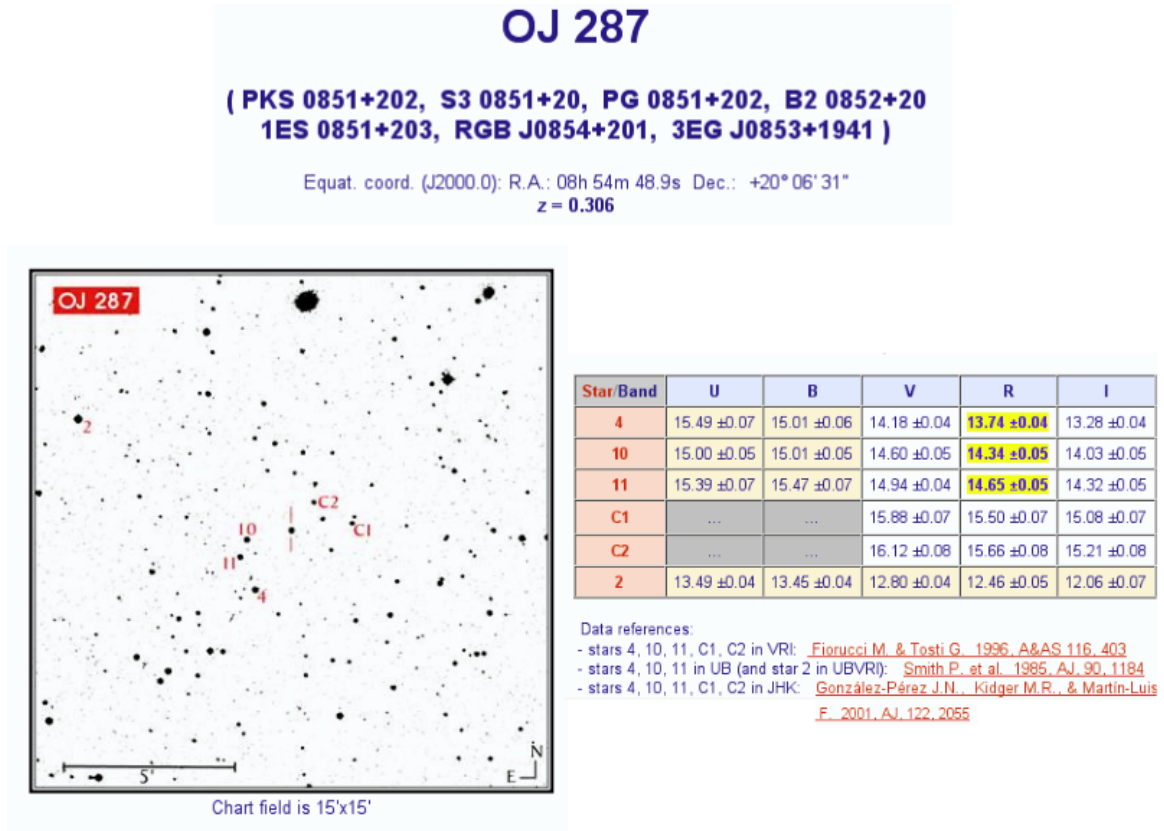


Figura 2.3: Mapa calibrado de identificación del blázar OJ 287 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Se usan las columnas B, V, R, I para calibrar. Ver <https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/oj287/oj287.html>

2.2. S4 0954+65

S4 0954+65 está clasificado como un objeto tipo BL Lac, con un corrimiento al rojo estimado de $z = 0.3694 \pm 0.0011$ y cuyo agujero negro tiene una masa estimada $M_{\text{BH}} \sim 2.3 \times 10^8 M_{\odot}$ (ver Becerra González et al., 2021). Una característica relevante de este objeto es que su corrimiento al rojo es motivo de debate. Por un lado, Becerra González et al. (2021) reportaron un valor $z = 0.3694 \pm 0.0011$, que se asemeja a las estimaciones realizadas por Lawrence et al. (1986) y Stickel et al. (1993) con valores reportados de $z = 0.368$ y $z = 0.367$, respectivamente. Mientras que Landoni et al. (2015) reportó un límite para el valor mínimo del corrimiento al rojo de 0.45. Esta controversia sigue vigente y es un problema que se presenta en general para los blázares tipo BL Lac pues al no presentar líneas de emisión en sus espectros se tienen que usar otros procedimientos para determinar el corrimiento al rojo.

Además de la discusión vigente respecto al corrimiento al rojo, existe otra discusión respecto a la clasificación de este blázar. Algunos autores han clasificado a S4 0954+65 como BL Lac y como FSRQ, incluso se ha clasificado como un blázar de transición entre las dos clasificaciones conocidas de blázares (ver Abdollahi et al., 2020).

Este blázar es ampliamente conocido por presentar rápidas variaciones, se ha detectado en varias ocasiones variabilidad intradía/intranoche en las bandas del óptico y radio, especialmente cuando se presenta un estallido de brillo (p. ej. Wagner et al., 1990; Wagner et al., 1993; Heidt and Wagner, 1996; Morozova et al., 2014; Bachev, 2015). Por otro lado, también se ha reportado la presencia de variabilidad en escalas de tiempo largas, es decir, LTV (p. ej. Gaur et al., 2019). Con respecto a esto último, Raiteri et al. (2021) reportaron una posible periodicidad de un mes para los picos principales en la curva de luz.

Respecto al comportamiento espectral de S4 0954+65 se han reportado principalmente comportamientos BWB en los diferentes periodos de observación (p. ej. Negi et al., 2022; Raiteri et al., 2021; Gaur et al., 2019).

En las Figuras 2.4 y 2.5 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente.

2.3. ON 231

ON 231, o W Comae, es un blázar que se clasifica como un objeto tipo BL Lac ($z = 0.102$; Paiano et al., 2017). Fue descubierto en el radio por Browne (1971). La masa reportada para el agujero negro de ON 231 es $\sim 1.02 \times 10^8 M_{\odot}$ (ver Wu et al., 2009). Es una fuente cuya curva de luz, en el óptico, a lo largo de varias épocas presenta variabilidad de diferentes escalas, desde días y semanas hasta meses y años (p. ej. Meng et al., 2018; Belokon et al., 2000; Massaro et al., 1999; Tosti et al., 1998; Liu et al., 1995). También se han observado variaciones en escalas de horas (ver Babadzhanyants and Belokon', 2002). Massaro et al. (1999) reportaron un fuerte destello de ON 231 cuando alcanzó un máximo histórico de $R \sim 12.2$ mag el 23 de abril de 1998.

W Comae estaba considerado como un objeto de estudio muy interesante para los

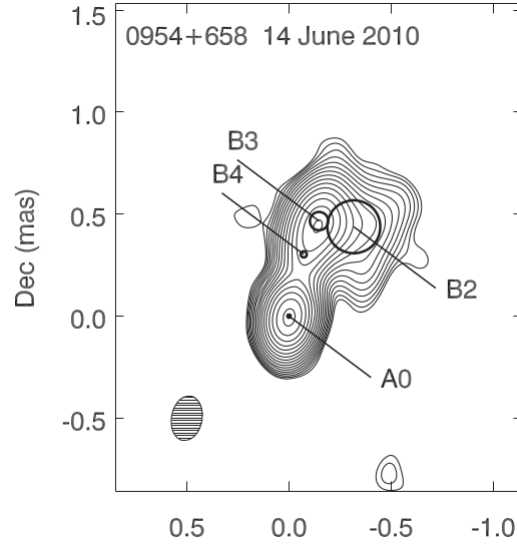


Figura 2.4: Imagen de intensidad total el 14 de junio de 2010 en radio a 43 GHz del blázar S4 0954+65 con una ponderación uniforme en escala de parsecs. A0 corresponde al núcleo, mientras que B2-B4 son nudos formados en el jet. (ver Jorstad et al., 2017).

observatorios de muy alta energía por la posibilidad de ser una fuente de rayos gamma detectables por telescopios Cherenkov. Esta hipótesis fue confirmada por VERITAS al detectar fotones de muy alta energía provenientes de esta fuente (ver Acciari et al., 2009).

Para el caso de la variabilidad espectral de W Comae, se han encontrado comportamientos BWB (p. ej. Otero-Santos et al., 2022; Meng et al., 2018), mientras que en el caso del estudio de larga duración hecho por Negi et al. (2022) no se encontró que ON 231 presentara alguna tendencia respecto a la variabilidad espectral.

En las Figuras 2.6 y 2.7 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente.

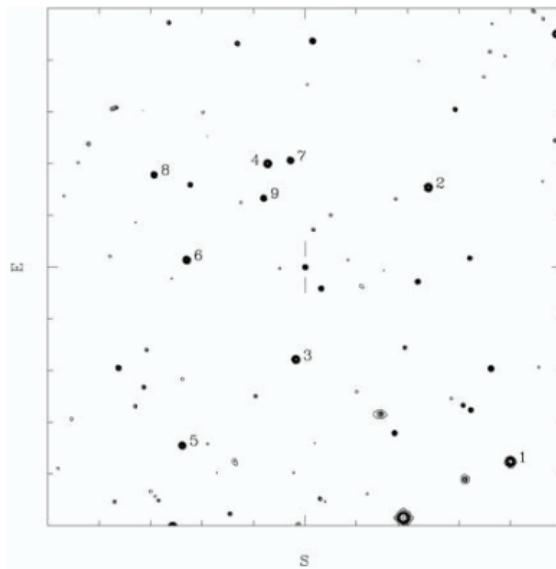
2.4. 3C 273

Es un blázar clasificado como FSRQ ($z = 0.1576$; Shang et al., 2011) fue el primer QSO en ser observado, aunque al principio se clasificó como estrella (ver Iriarte and Chavira, 1957). La primera vez que se designó como un QSO fue en el tercer catálogo de Cambridge (ver Edge et al., 1959). Los primeros estudios de esta fuente estaban enfocados en identificar sus componentes, la posición del objeto (ver Hazard et al., 1963), y el corrimiento al rojo de las líneas espectrales (ver Schmidt, 1963). Es, además, una fuente muy brillante, especialmente en el óptico (ver Courvoisier, 1998).

Desde su descubrimiento, 3C 273 se ha estudiado en todas las longitudes de onda y hay mucha literatura en la que se aborda la naturaleza altamente variable de la fuente desde el radio hasta los rayos gamma, la forma y emisión del jet (p. ej. Courvoisier, 1998; Sambruna et al., 2001; Attridge et al., 2005; Savolainen et al., 2006; Lisakov

0954+658 (S4 0954+65)Coordinates

R.A. = 09:58:47.244, Dec. = +65:33:54.80 (2000)
z = 0.368

**GASP suggested stars: 2 3 4 6 7****Comparison stars**

Star	B	V	R	I
1	13.58 (0.02)	12.91 (0.02)	12.56 (0.02)	
2	15.02 (0.02)	14.37 (0.02)	13.96 (0.03)	13.58 (0.05)
3	15.45 (0.02)	14.61 (0.02)	14.12 (0.02)	13.67 (0.07)
4	16.12 (0.04)	14.94 (0.03)	14.25 (0.03)	13.56 (0.04)
5	16.22 (0.02)	15.31 (0.02)	14.85 (0.02)	
6	16.84 (0.02)	15.35 (0.03)	14.43 (0.03)	13.58 (0.05)
7	16.60 (0.04)	15.75 (0.02)	15.22 (0.03)	14.73 (0.07)
8	16.65 (0.02)	15.85 (0.06)	15.39 (0.04)	
9	17.01 (0.02)	16.17 (0.05)	15.69 (0.02)	15.11 (0.07)

Figura 2.5: Mapa calibrado de identificación del blázar S4 0954+65 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/s4_0954/s4_0954.html

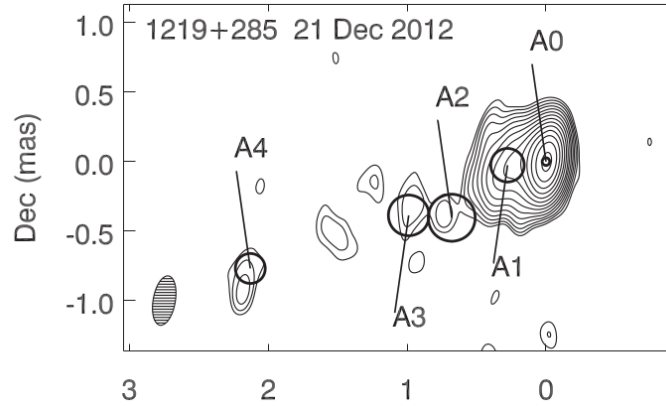


Figura 2.6: Imagen de intensidad total el 21 de diciembre de 2012 en radio a 43 GHz del blázar ON 231 con una ponderación uniforme en escala de parsecs. A0 corresponde al núcleo del blázar, mientras que A1 es un nudo que domina la emisión junto con el núcleo y el resto son rasgos que destacan y que forman parte del jet (ver Jorstad et al., 2017).

et al., 2017).

Ha sido observado por más de 50 años (p. ej. Vol'vach et al., 2013) y se ha encontrado que presenta variabilidad en diferentes escalas. Fan et al. (2009) reportaron escalas de IDV desde 13 a 245 minutos, y más recientemente, Liu et al. (2019) reportaron la presencia de variabilidad de este mismo tipo, con escalas diferentes. También se encontraron variaciones de 23.9 a 744 días (ver Fan et al., 2014). Aún en estudios de años recientes se sigue reportando la presencia de variabilidad en diferentes escalas para este blázar (p. ej. Otero-Santos et al., 2022; Liu et al., 2021; Kalita et al., 2021; Safna et al., 2020).

Dai et al. (2009) estudiaron la variabilidad espectral de la fuente, y encontraron que presenta un comportamiento BWB de la IDV y la LTV, por otro lado, Otero-Santos et al. (2022) encontraron un comportamiento BWB para escalas de tiempo largas, pero diferentes comportamientos al analizar a la fuente en escalas de tiempo cortas, es decir, en STV.

Las propiedades del objeto en radio y el óptico se han estudiado con una resolución cada vez mayor desde las primeras observaciones en 1963 (p. ej. Courvoisier et al., 2003; Stawarz, 2004); así como las componentes superlumínicas del jet (p. ej. Liu et al., 2015).

Zhang et al. (2019) obtuvieron una aproximación para la masa del SMBH en el blázar de $(4.1_{-0.4}^{+0.3}) \times 10^8 M_{\odot}$.

En las Figuras 2.8 y 2.9 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente.

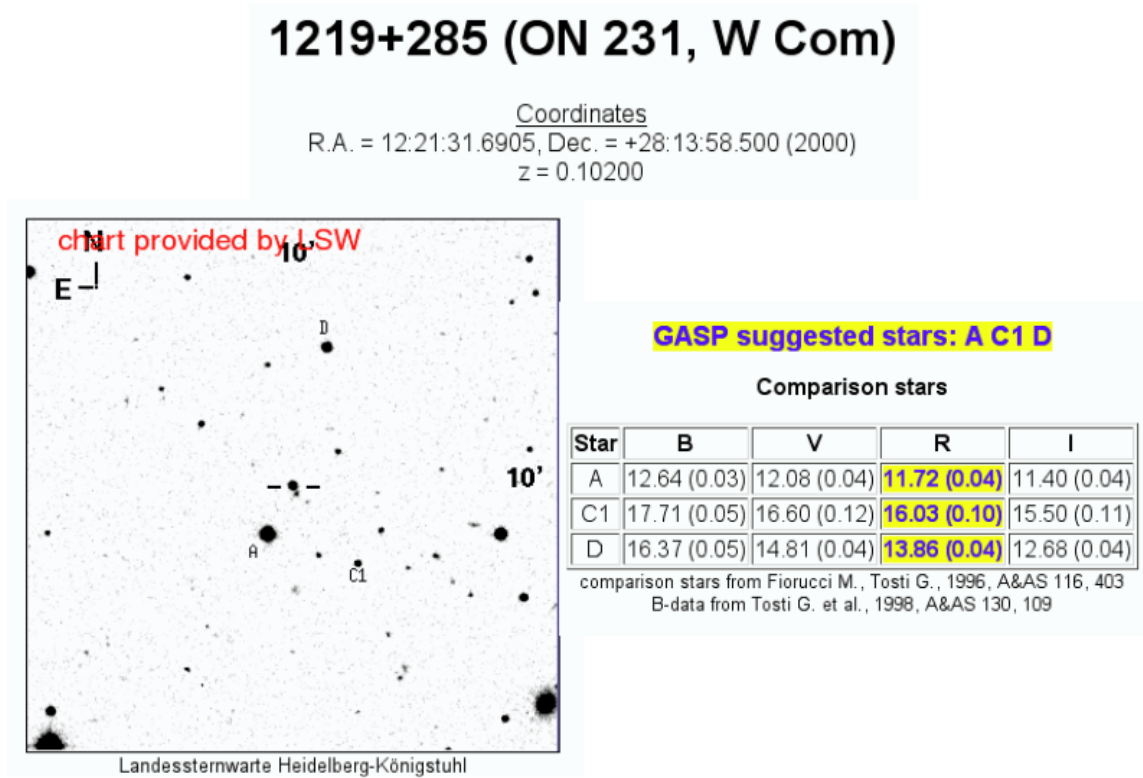


Figura 2.7: Mapa calibrado de identificación del blázar ON 231 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver <https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/on231/on231.html>

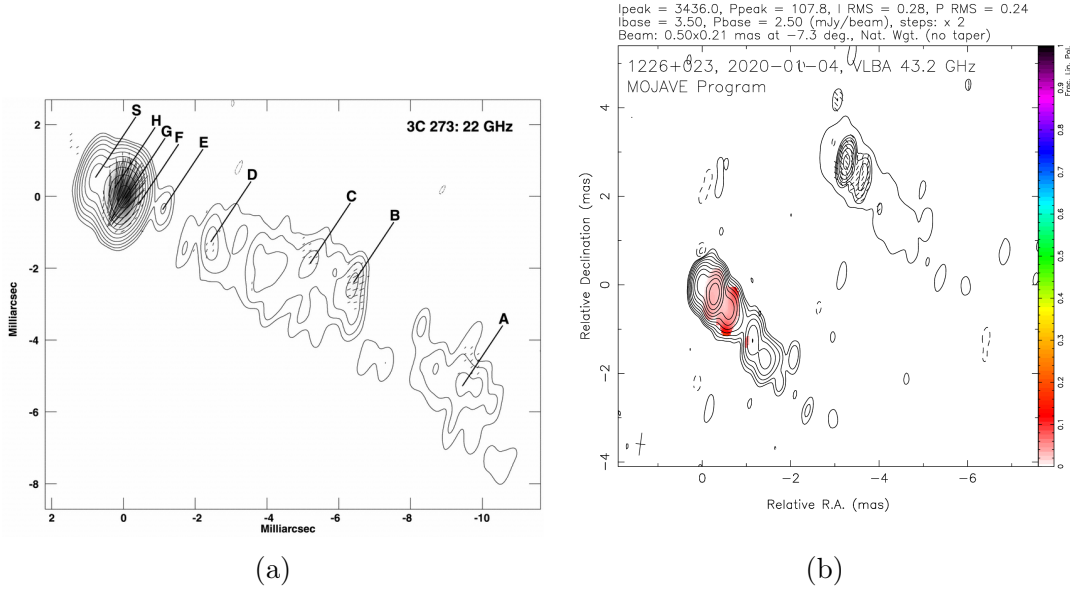


Figura 2.8: En (a) se muestra una imagen de la intensidad total de 3C 273 en radio a 22 GHz, con los vectores de polarización superpuestos, época marzo de 1999. La escala gris indica la intensidad linealmente polarizada. G y H forman parte del núcleo, A-F son componentes del jet que sale del núcleo (ver Lister and Smith, 2000). En (b) tenemos el mapa VLBA en radio a 43 GHz de 3C 273, del 4 de enero de 2020. Se observa la estructura del jet del blázar (ver Lister et al., 2018).

2.5. 3C 279

3C 279 es un blázar clasificado como FSRQ ($z = 0.536$; Marziani et al., 1996), fue el primer blázar en el que se detectaron movimientos superlumínicos (ver Whitney et al., 1971). El agujero negro supermasivo en el centro de este blázar tiene una masa $\sim 8 \times 10^8 M_{\odot}$ (ver Nilsson et al., 2009). Además, fue uno de los primeros blázares en los que se detectó la emisión de rayos gamma (ver Hartman et al., 1992) y fue el primer FSRQ para el que se detectó la emisión de rayos gamma de muy alta energía (ver MAGIC Collaboration et al., 2008). Es, además, una de las fuentes de las que se obtuvo la primera evidencia de variabilidad rápida de estructura (ver Knight et al., 1971).

Recientemente Kim et al. (2020) usaron técnicas de ultra alta resolución, con el Event Horizon Telescope (EHT), para observar la parte más interna del jet presente en 3C 279 (ver Figura 2.10). El objetivo fue estudiar la morfología de la base del jet, donde se cree que se origina la emisión de rayos gamma, de acuerdo a diferentes modelos.

En un estudio de variabilidad de larga duración, Zhang et al. (2021) encontraron LTV en el periodo de observación de la fuente. Encontraron además una posible variación cuasi-periódica cada 5.6 años. Un resultado más de este mismo estudio es que en el estado de baja actividad la fuente muestra un comportamiento BWB, mientras que en el estado de alta actividad el espectro óptico es estable, es decir, el

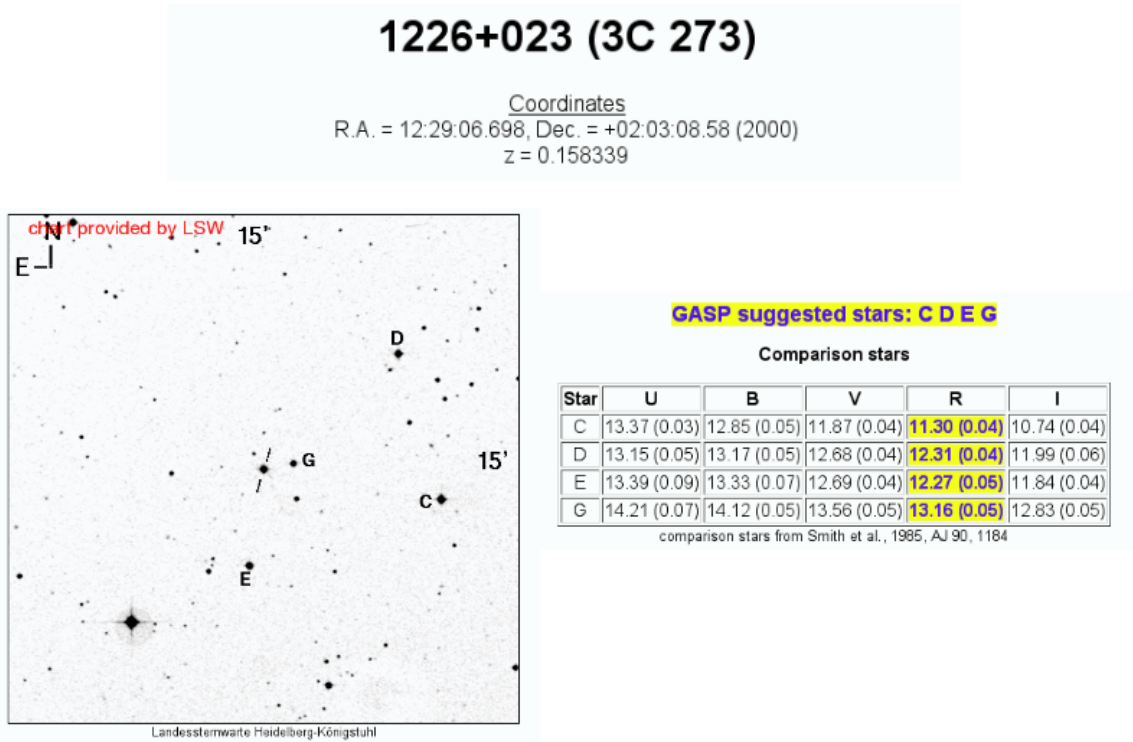


Figura 2.9: Mapa calibrado de identificación del blázar 3C 273 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver <https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/3c273/3c273.html>

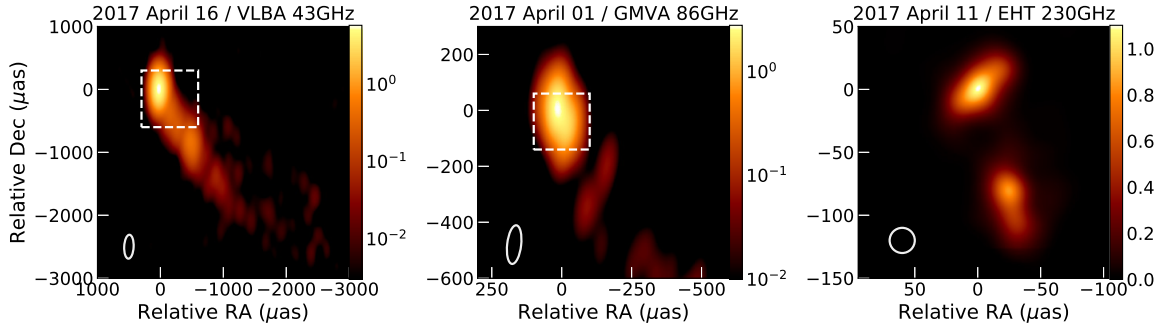


Figura 2.10: Ilustración de la estructura multibanda del jet en 3C 279 (ver Kim et al., 2020).

índice espectral no varía con el brillo.

La variabilidad en el óptico para diferentes escalas de tiempo es una constante en los diferentes estudios, individuales o de muestras más grandes. Bhatta (2021) reportó la presencia de LTV en un estudio con observaciones de más de una década. Por otro lado, respecto a la variabilidad intra-día, Agarwal et al. (2019) encontraron amplitudes de variabilidad entre 5.20 % y 17.9 % entre febrero y julio de 2018.

Otros resultados sobre la variabilidad espectral de 3C 279 han encontrado que la fuente presenta un débil comportamiento BWB (ver Agarwal et al., 2019; Zhang et al., 2022). Otero-Santos et al. (2022) reportaron la ausencia de algún comportamiento claro al hacer un análisis de larga duración pero tendencias claras en escalas de tiempo más cortas que correspondían a estallidos o rápidas variaciones de flujo.

En las Figuras 2.11 y 2.12 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente.

2.6. PKS 1510-089

Esta fuente, es un blázar de tipo FSRQ ($z = 0.36$; Thompson et al., 1990) y es una de las fuentes extragalácticas más brillantes y variables. Como muchos otros blázares, presenta variabilidad en todas las longitudes de onda, desde el radio hasta rayos gamma (p. ej. Kushwaha et al., 2016; Beaklini et al., 2017; Castignani et al., 2017; Prince et al., 2019). Además presenta una estructura dominada por emisiones en radio cerca del núcleo.

En las curvas de luz multibanda de PKS 1510-089 se ha observado periodicidad anual (p.ej. Xie et al., 2008; Abdo et al., 2010a; Fu et al., 2014; Sandrinelli et al., 2016) en las variaciones que presenta la fuente. Además, recientemente, Li et al. (2021b) reportaron la detección de oscilaciones cuasi-periódicas en la curva de luz en radio con una muestra de observaciones colectadas durante 38 años.

La variabilidad de flujo de este blázar ha presentado diferentes comportamientos, por ejemplo, Otero-Santos et al. (2022) reportaron una variabilidad lenta y con amplitudes pequeñas comparadas con la actividad de otros FSRQ en su estudio. Por otro lado, Safna et al. (2020), reportaron una LTV con amplitudes en todas las bandas

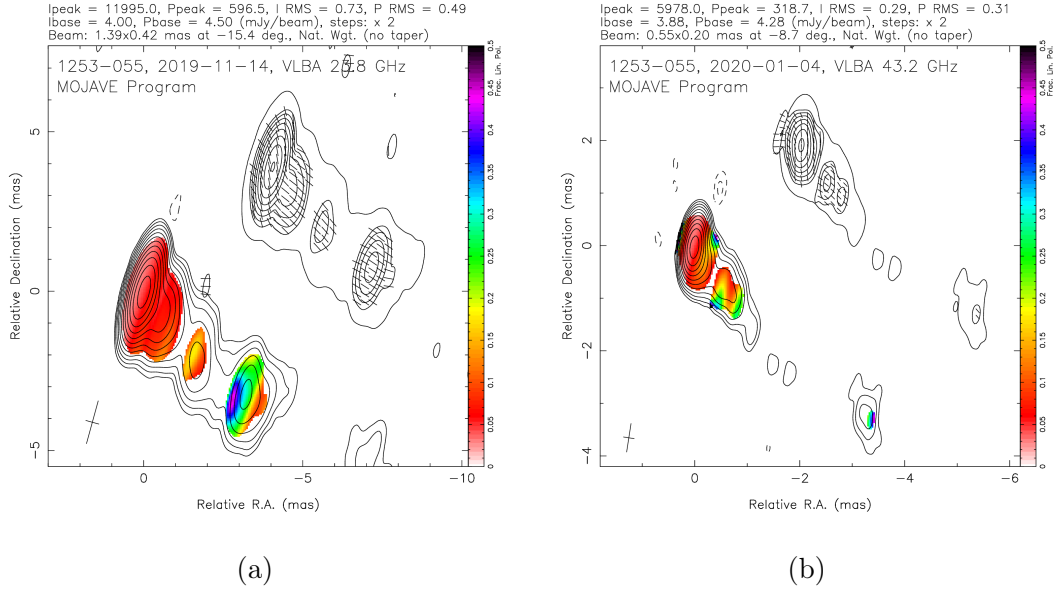


Figura 2.11: Mapas VLBA en radio a (a) 23 GHz el 14 de noviembre de 2019 y (b) 43 GHz el 4 de enero de 2020 de 3C 279 en la muestra MOJAVE. Se observa en ambas figuras la estructura del jet en escala de parsecs. (ver Lister et al., 2018).

similares al resto de FSRQ en su muestra.

Respecto al comportamiento del índice espectral, en general se reportan comportamientos RWB para esta fuente, en algunos casos encontrando que esta es una tendencia común para los FSRQ (ver Otero-Santos et al., 2022; Zhang et al., 2022; Safna et al., 2020). Rakshit (2020) estimó la masa del SMBH encontrando el valor $5.71^{+0.62}_{-0.58} \times 10^7 M_{\odot}$. En las Figuras 2.13 y 2.14 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente. Hay que destacar que aunque en escala de parsecs solo se identifica un jet, en escala de kiloparsecs se observa una emisión en dos direcciones.

2.7. DA 406

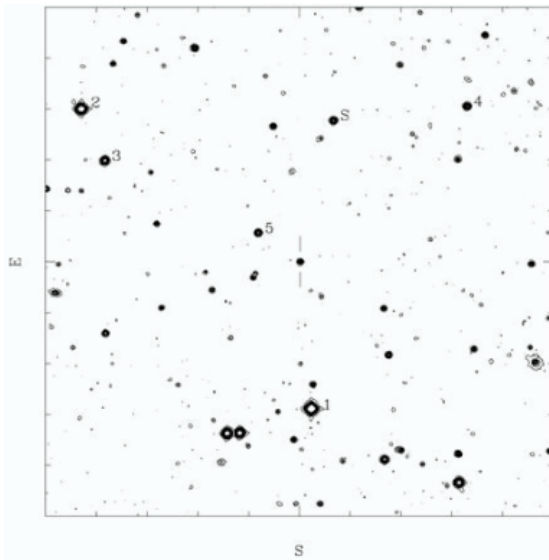
Este blázar está clasificado como un FSRQ ($z = 1.4$; Schneider et al., 2010), y está entre los blázares con emisiones en rayos gamma de alta energía detectados por EGRET (*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*). Es conocido por el movimiento superlumínico que presenta en el jet (ver Jorstad et al., 2001; Piner and Kingham, 1997). La masa estimada del SMBH de este blázar es $\sim 1.12 \times 10^{10} M_{\odot}$ (ver Fan and Cao, 2004).

Murphy et al. (1993) encontraron una morfología triple en bandas de radio en escala de kiloparsecs, es decir, identificaron tres componentes en la imagen: el núcleo y dos lóbulos opuestos entre ellos. Esta estructura con dos lóbulos mostró que la fuente está alineada en esta escala.

DA 406 es una fuente muy lejana, de hecho la más lejana de la muestra, por lo

1253-055 (3C 279, 4C -05.55, CTA 56)

Coordinates
 R.A. = 12:56:11.1665, Dec. = -05:47:21.523 (2000.0)
 z = 0.5362

**GASP suggested stars: 1 2 3 5**

Comparison stars

Star	U	B	V	R	I
1	13.08 (0.06)	13.02 (0.03)	12.42 (0.03)	12.05 (0.02)	11.70 (0.02)
2	14.06 (0.07)	13.73 (0.04)	12.99 (0.04)	12.56 (0.03)	12.17 (0.03)
3	15.51 (0.07)	15.49 (0.03)	14.87 (0.03)	14.53 (0.02)	14.20 (0.08)
4		16.53 (0.05)	15.66 (0.03)	15.13 (0.02)	
5	17.23 (0.16)	16.79 (0.04)	15.98 (0.04)	15.47 (0.02)	15.00 (0.04)
S*	---	---	---	---	---

comparison stars from Raiteri C.M. et al., 1998, A&AS 130, 495
 U and I data from Smith P.S. & Balonek T.J., 1998, PASP 110, 1164

Figura 2.12: Mapa calibrado de identificación del blázar 3C 279 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver <https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/3c279/3c279.html>

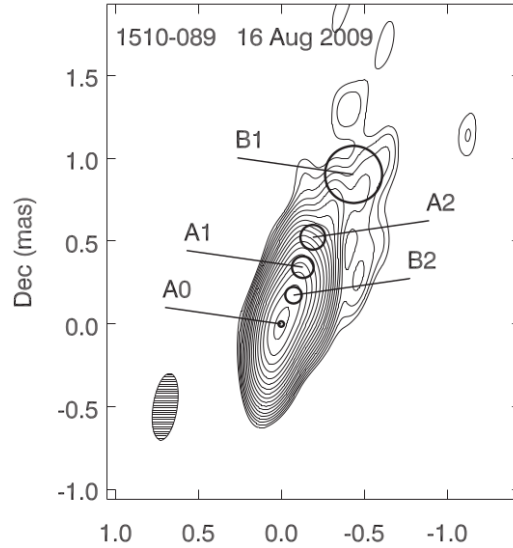


Figura 2.13: Imagen de intensidad total el 16 de agosto de 2009 en radio a 43 GHz del blázar PKS 1510-089 con una ponderación uniforme. A0 es el núcleo de la fuente, mientras que A1 y A2 son rasgos cuasi-estáticos en el jet. B1 y B2 son nudos que se mueven en el jet (ver Jorstad et al., 2017).

que es difícil realizar observaciones constantes de la fuente. No se han hecho públicos estudios recientes en el óptico de esta fuente y, en general, hay poca literatura sobre la misma para estudios de variabilidad en el óptico.

Una de los estudios de los que se puede rescatar información de DA 406 respecto a su variabilidad espectral es el realizado por Negi et al. (2022) que reportaron un comportamiento RWB para este blázar.

En las Figuras 2.15 y 2.16 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente. Dado que la imagen de la morfología es en escala de parsecs solo se observa un jet, sin embargo, en escala de kiloparsecs se observa la estructura de tres componentes mencionada anteriormente.

2.8. Markarian 501

Markarian 501 es un blázar tipo BL Lac ($z = 0.337$; Stickel et al., 1993). Apareció por primera vez en un catálogo ultravioleta (ver Markaryan and Lipovetskii, 1972) y es actualmente uno de los blázares más estudiados, en parte, por la cercanía en comparación con otros blázares. Presenta, además, variabilidad rápida en escalas de unos pocos minutos (ver Albert et al., 2007).

En observaciones posteriores a su descubrimiento, Quinn et al. (1996) detectaron emisiones en el rango de muy alta energía, desde entonces, la emisión de Markarian 501 en este rango se ha estudiado de forma continua durante diferentes periodos de actividad.

Recientemente, Bhatta (2021) encontró una fuerte correlación entre las emisiones de Markarian 501 en rayos gamma y en el óptico, lo que sugiere que la región de

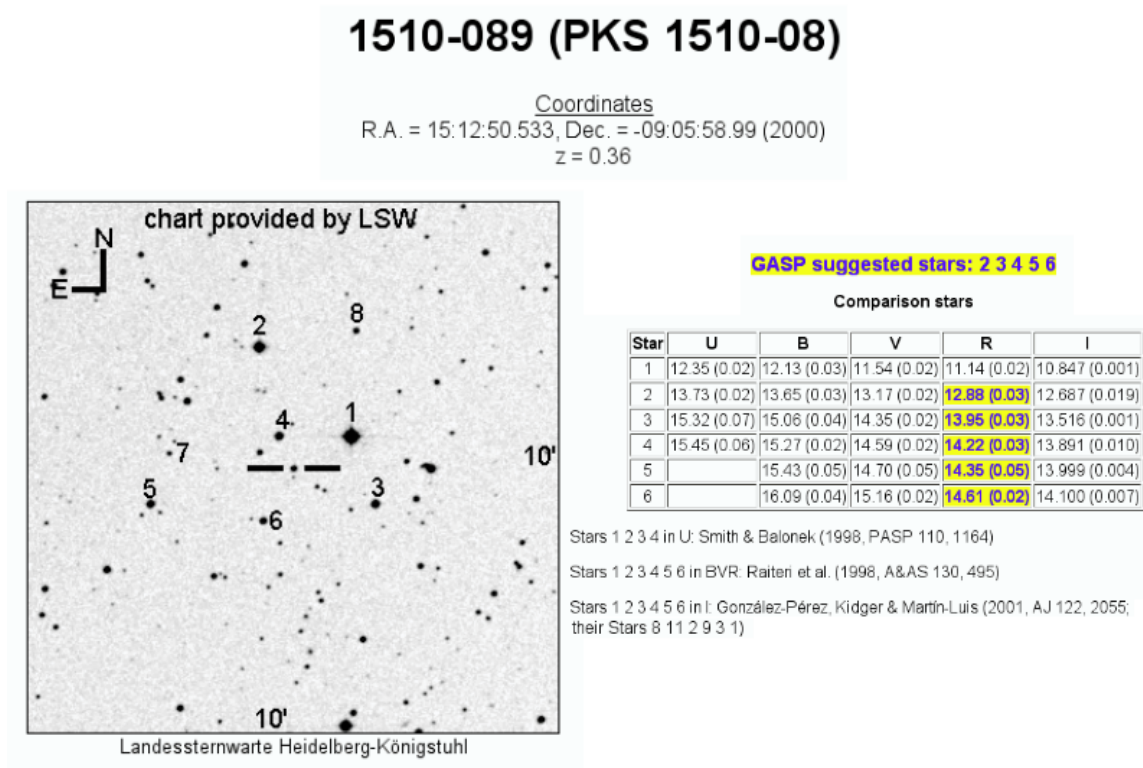


Figura 2.14: Mapa calibrado de identificación del blazar PKS 1510-089 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver <https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/pks1510/pks1510.html>

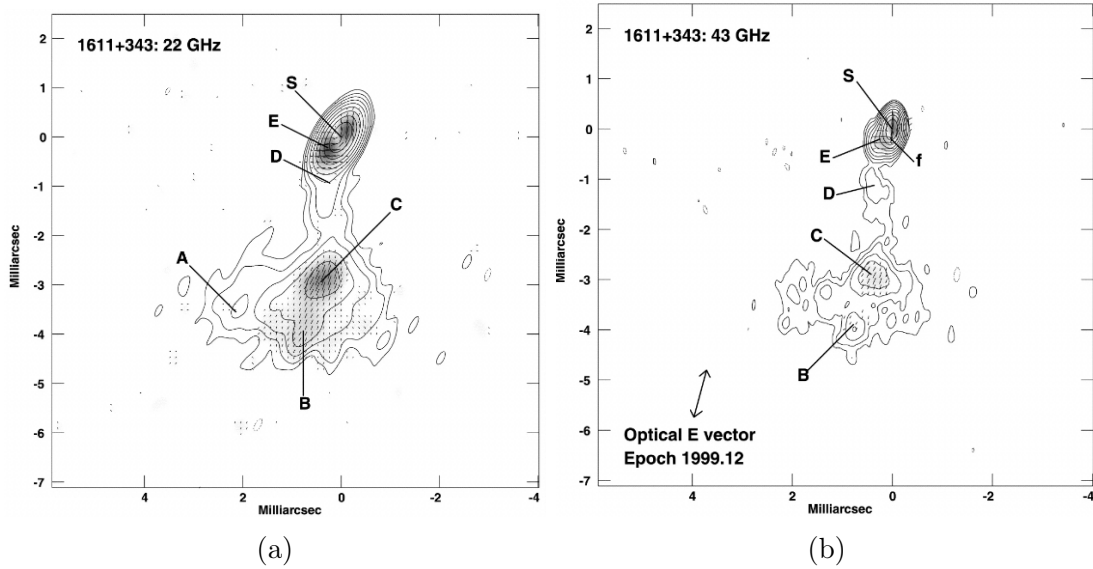


Figura 2.15: En (a) y (b) se muestran imágenes de la intensidad total de DA 406 en radio a 22 GHz y 43 GHz, respectivamente, en marzo de 1999. S es el núcleo de la fuente, mientras que el resto de componentes corresponden a rasgos del jet (ver Lister and Smith, 2000).

emisión de rayos gamma y óptico son coespaciales. Por otro lado, Feng et al. (2017) encontraron que este blázar presentó IDV en al menos 6 noches de su conjunto de observaciones.

Otero-Santos et al. (2022) reportaron una variabilidad de baja intensidad en la curva de luz de Markarian 501, además de reportar que la contribución en las emisiones en el óptico de la galaxia huésped es de alrededor de un 40%. Y respecto a la variabilidad espectral reportaron un comportamiento BWB.

Este último hecho contrasta con lo reportado por Negi et al. (2022), pues de su estudio encontraron que Markarian 501 presenta una tendencia RWB. La diferencia crucial en ambos casos es el tiempo para el cuál se realiza el análisis. En el primer caso se hizo el análisis con observaciones de 10 años, mientras que para el segundo solo se tomaron observaciones de alrededor de 3 años.

El SMBH que se encuentra al centro de esta fuente tiene una masa aproximada de $\sim 5.7 \times 10^8 M_{\odot}$ (ver Juryšek et al., 2022).

En las Figuras 2.17 y 2.18 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente.

2.9. BL Lacerta

BL Lacerta es el blázar prototipo de la clase con el mismo nombre ($z = 0.0686$; Vermeulen et al., 1995). Es conocido por presentar una gran variabilidad en el óptico y es una de las fuentes más observadas por campañas multibanda. Muestra esta variabilidad en escalas de tiempo cortas o IDV (p. ej. Clements and Carini, 2001;

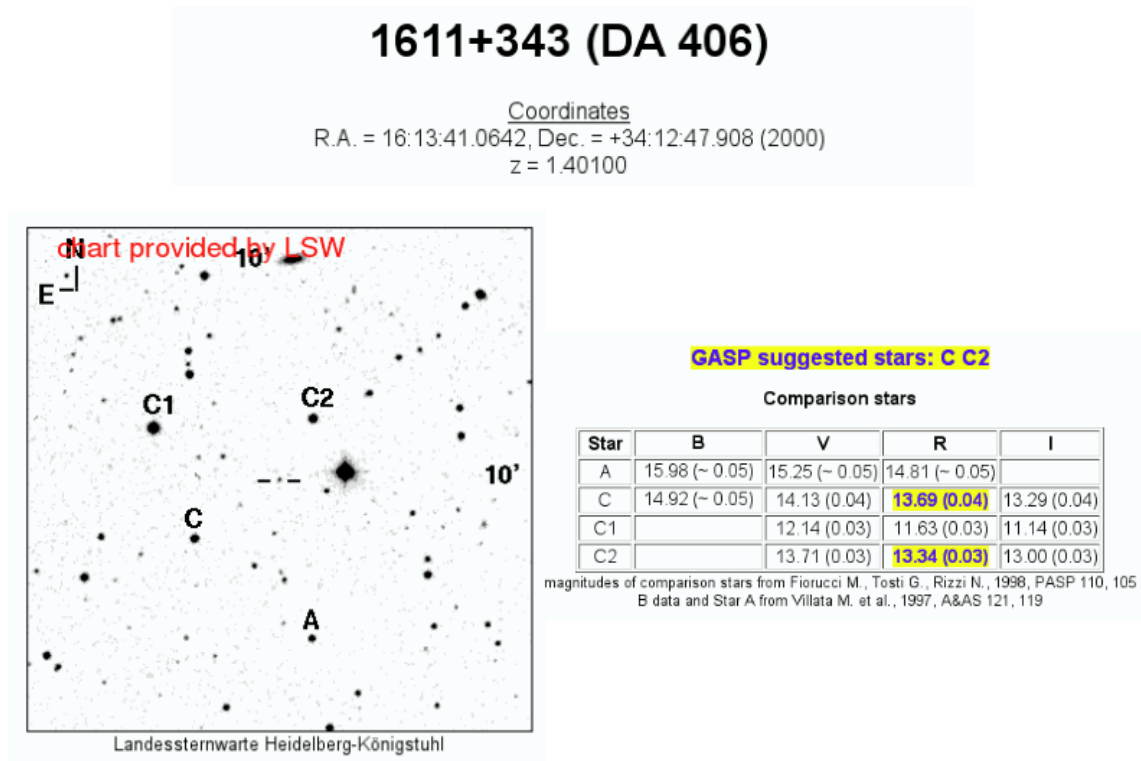


Figura 2.16: Mapa calibrado de identificación del blázar DA 406 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver <https://hussongs.astrose.unam.mx/blazars/target/da406/da406.html>

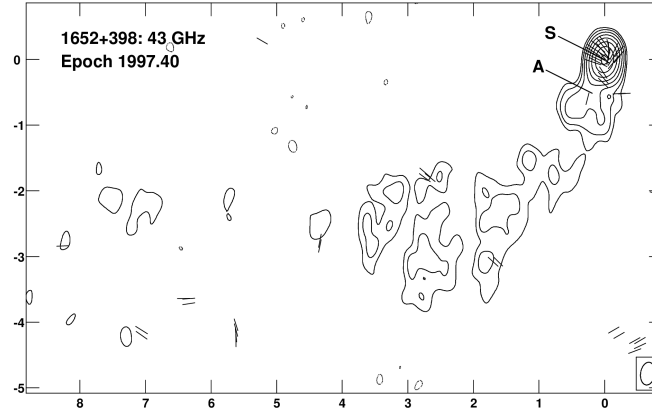


Figura 2.17: Imagen de intensidad total en radio a 43 GHz del blázar Markarian 501 en escala de parsecs, con los vectores de polarización superpuestos, época 1997.40. La escala de gris indica la intensidad linealmente polarizada. S corresponde al núcleo y se observa la estructura del jet (ver Lister and Smith, 2000).

Gaur et al., 2014; Agarwal and Gupta, 2015).

En diferentes estudios se ha encontrado que las variaciones en el flujo de BL Lacerta están asociadas a cambios espectrales, es decir, presenta variabilidad espectral relacionada de alguna manera con la variación en el flujo (p. ej. Villata et al., 2002; Papadakis et al., 2003; Hu et al., 2006; Gaur et al., 2019).

Hay diversos estudios en los que se ha reportado la presencia de un comportamiento BWB en la fuente (p. ej. Li et al., 2021a; Negi et al., 2022; Otero-Santos et al., 2022). Esta tendencia se presenta más en estudios de escala temporal corta que en estudios de escala larga, lo que posiblemente significa que hay dos componentes diferentes en la variabilidad de BL Lacerta (ver Villata et al., 2002). Algunos otros estudios han encontrado que no se puede establecer si la fuente presenta uno u otro comportamiento (ver Benítez and Ramírez, 2006).

Titarchuk and Seifina (2017) realizaron una estimación de la masa del SMBH de BL Lacerta encontrando un valor $3 \times 10^7 M_{\odot}$. En las Figuras 2.19 y 2.20 se encuentran la morfología de la fuente y un mapa de identificación, respectivamente.

En la Tabla 2.2 se presentan algunas propiedades relevantes de cada uno de los blázares en la muestra.

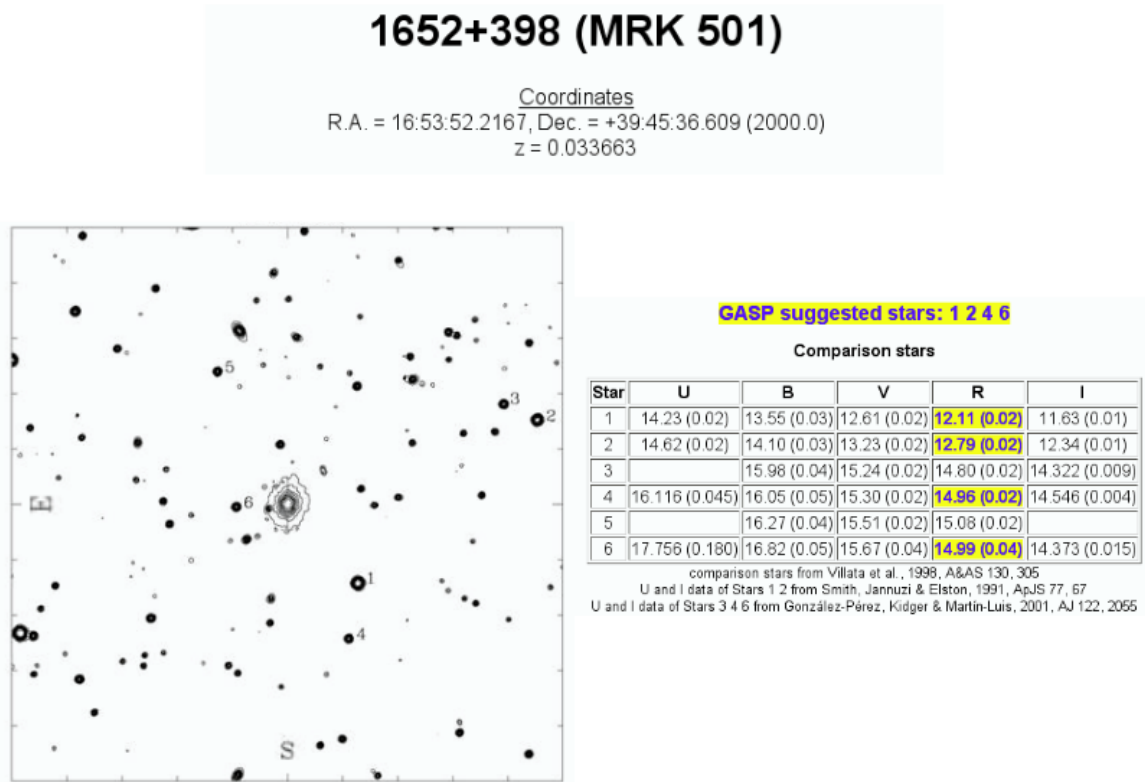


Figura 2.18: Mapa calibrado de identificación del blazar Markarian 501 y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver <https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/mkn501/mkn501.html>

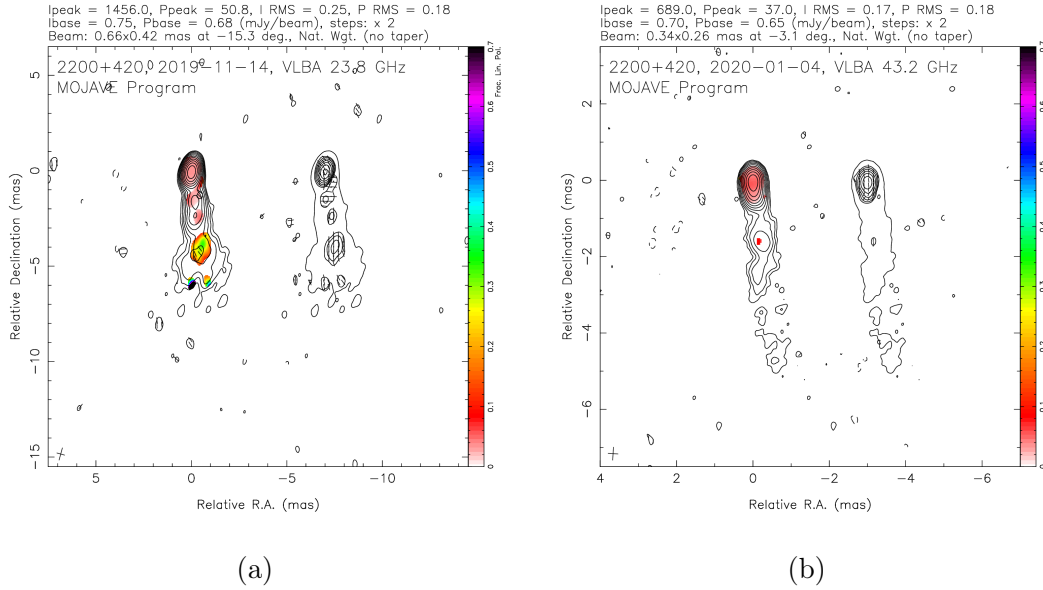


Figura 2.19: Mapas VLBA en radio a (a) 23 GHz y (b) 43 GHz de BL Lacerta en la muestra MOJAVE en escala de parsecs. Se observa el núcleo y la estructura de un jet, aunque en escala de kiloparsecs no se observa ningún jet en esta fuente (ver Lister et al., 2018).

Tabla 2.2: Muestra de blázares observados con *MEXMAN* y el 84cm.

Fuente (1)	LD [Mpc] (2)	Morfología (3)	β_{\max} (4)	Γ_{\min} (5)	β_{prom} (6)	Γ_{\min} (7)	$M_{\text{BH}} [M_{\odot}]$ (8)
OJ 287	1577	One-sided	15.14 ± 0.43 ^(a)	15.17	4.59 ± 0.38 ^(a)	4.70	1.85×10^{10}
S4 0954+650	1966	One-sided	14.8 ± 1.4 ^(b)	14.83	7.61 ± 0.36 ^(b)	7.68	2.3×10^8
ON 231	465	One-sided	8.20 ± 0.56 ^(a)	8.26	5.53 ± 0.32 ^(a)	5.62	1.02×10^8
3C 273	745	One-sided	14.84 ± 0.16 ^(a)	14.87	8.30 ± 0.27 ^(a)	8.36	4.1×10^8
3C 279	3071	Two-sided	20.50 ± 0.82 ^(a)	20.52	13.06 ± 0.12 ^(a)	13.10	8×10^8
PKS 1510-089	1907	Two-sided	28.00 ± 0.61 ^(b)	28.02	19.3 ± 1.7 ^(b)	19.33	5.71×10^7
DA 406	10102	One-sided	31.1 ± 1.9 ^(b)	31.12	9.60 ± 0.71 ^(b)	9.65	1.12×10^{10}
Markarian 501	147	One-sided	0.89 ± 0.17 ^(a)	1.34	0.074 ± 0.018 ^(a)	$1.00\bar{3}$	5.7×10^8
BL Lacerta	305	Halo	10.00 ± 0.86 ^(a)	10.05	4.46 ± 0.037 ^(a)	4.57	3×10^7

Notas: (1) Nombre común de la fuente; (2) distancia de luminosidad en megaparsec; (3) morfología de la fuente respecto a los jets en escala de kiloparsecs; (4) velocidad aparente máxima del jet; (5) factor de Lorentz mínimo en el marco de referencia de la región de emisión considerando la velocidad máxima del jet; (6) velocidad aparente promedio del jet ; (7) factor de Lorentz mínimo en el marco de referencia de la región de emisión considerando la velocidad promedio del jet; (8) masa del SMBH (SMBBH) del blázar, en masas solares, ver referencias en las secciones previas.

^(a) ver Lister et al. (2021).

^(b) ver Lister et al. (2019).

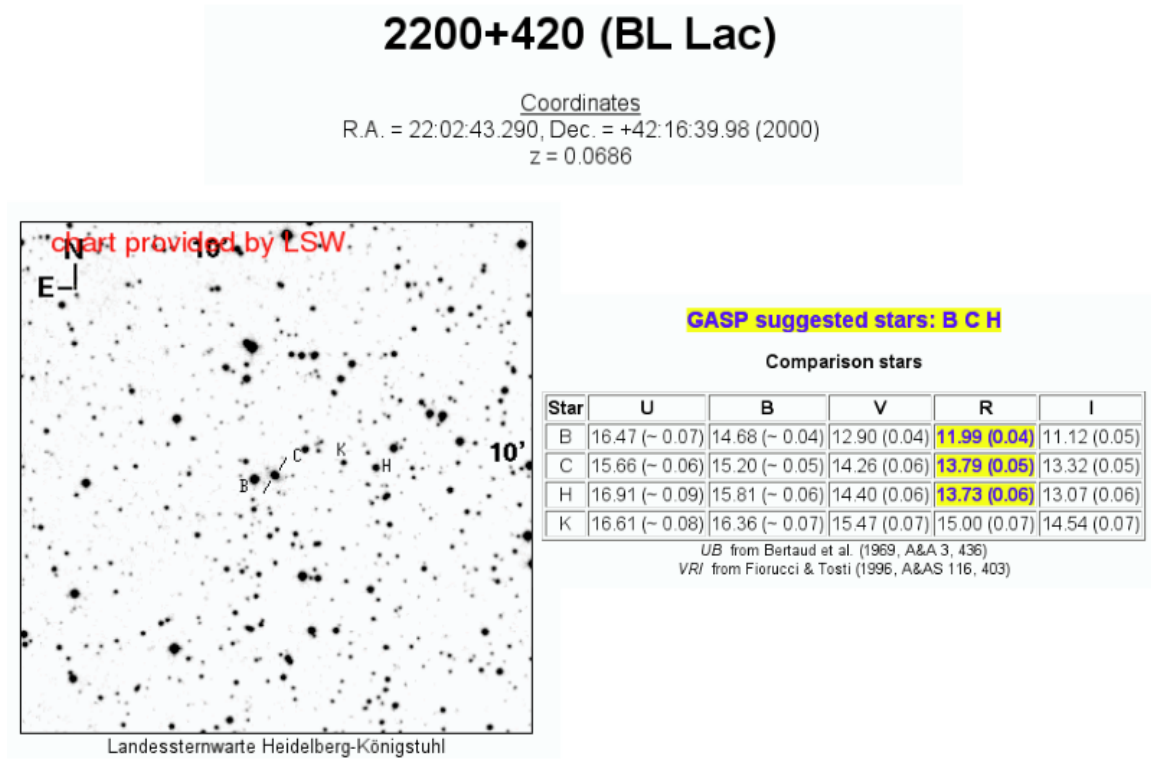


Figura 2.20: Mapa calibrado de identificación del blázar BL Lacerta y estándares de comparación que se utilizan para realizar la fotometría. Ver <https://hussongs.astrosen.unam.mx/blazars/target/bllac/bllac.html>

Capítulo 3

Observaciones, curvas de luz y variabilidad

3.1. Telescopio de 84 cm

En esta tesis, utilizamos datos obtenidos en el Observatorio Astronómico Nacional ubicado en la sierra de San Pedro Mártir (OAN-SPM) en BC, México. Para este proyecto se asignaron un total de 14 noches correspondientes a las noches del 22 al 24 de abril, del 2 al 7 de mayo y del 5, 6, 9 y 10 de junio del 2021, obteniendo un total de 441 puntos, con el telescopio de 84cm y la rueda de filtros *MEXMAN*¹ (ver Figura 3.1). En todas las temporadas se usó el detector CCD E2V Marconi 5 (CCD-M5) y los filtros B, V, R e I, los cuales son filtros de banda ancha definidos en el sistema fotométrico de Bessell (Bessell, 1990). Este sistema fotométrico está calibrado para hacer observaciones CCD en el sistema de Johnson-Cousins, por lo que usamos los puntos cero de este último sistema para obtener nuestras magnitudes calibradas fotométricamente. La reducción de los datos se hizo de manera estándar utilizando un programa propio. El programa de reducción inicia promediando las imágenes del bias (valor del piso de cuentas del detector CCD). La imagen promedio se resta a todas las imágenes (campos planos y objetos) en los cuatro filtros. Posteriormente, las imágenes de objetos se dividen por el campo plano promedio obtenido en los distintos filtros utilizados en las observaciones. Esta calibración es importante pues corrige por las diferencias en sensibilidad de los píxeles del CCD. Finalmente, la técnica de fotometría de apertura se usó para medir el brillo o magnitud de los objetos y de estrellas estándares previamente identificadas en los mapas por objeto. Con este procedimiento se obtuvo la magnitud utilizando una apertura de 7.5" tanto para los blázares como para las estrellas estándares de comparación. La calibración en flujo se realiza de manera directa, debido a que las estándares de comparación están en la misma imagen donde se ubica el blázar, a pocos segundos de arco de distancia. Esto garantiza que las condiciones de cielo y extinción son similares. Con los datos de magnitud aparente y día juliano modificado (MJD), se construyen las curvas de luz para cada blázar.

¹<https://www.astrossp.unam.mx/en/users/telescopes/0-84m-telescope>

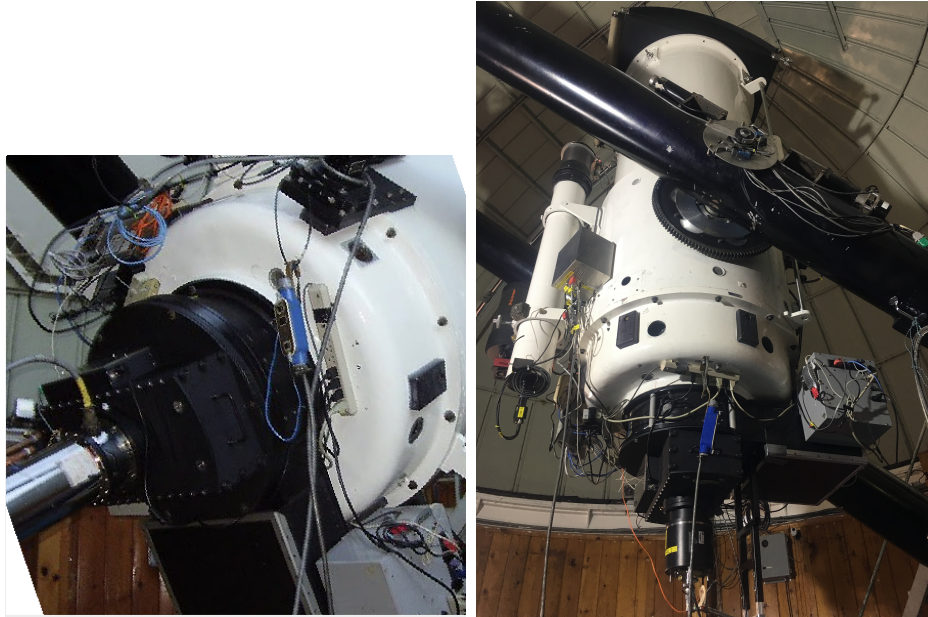


Figura 3.1: Izquierda: Imagen de la cámara *MEXMAN* montada en el 84cm en el OAN-SPM. Derecha imagen del telescopio posicionado al cenit. Ver <https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/instrumentos/imagendirecta/mexman>.

3.2. Curvas de luz y variabilidad de flujo

A lo largo de esta sección se describe el proceso general para obtener las curvas de luz de cada blázar en la muestra, así como el análisis de variabilidad de flujo que se puede observar en las mismas curvas de luz.

Como parte de este proceso se presentan los códigos en python que se utilizaron para realizar ciertas partes del proceso. En caso de ser necesario, los códigos completos se pueden consultar en **este repositorio** de GitHub². Se acompañan los códigos con explicaciones de su funcionamiento, en este sentido, se espera que el lector tenga un conocimiento básico de python y de la librería *pandas*³.

Previo al análisis completo de datos se realizó una limpieza de los mismos y un preprocesamiento para que la manipulación de los mismos fuera más eficiente y más clara a lo largo del desarrollo de los códigos. Todo lo asociado a este preprocesamiento está disponible en el repositorio de GitHub mencionado anteriormente.

3.2.1. Curvas de luz

Las curvas de luz son gráficas del flujo (o magnitud) de una fuente contra el tiempo, en este caso el día juliano modificado, MDJ del inglés. Estas son importantes al estudiar fuentes variables. Las mediciones de la magnitud aparente, y por tanto del flujo, no solo dependen de la fuente, pues existe la presencia de ruido que afecta

²https://github.com/donasmora/Tesis_Lic, en caso de que revise la versión impresa.

³Se sugieren los títulos *Learning Python* de Mark Sutz y el capítulo 5 de *Python for Data Analysis* de Wes McKinney para profundizar en estas herramientas

las mediciones que se hacen, o también pueden afectar las condiciones atmosféricas tales como nubes o brillo de la luna. También es importante considerar la presencia de errores estadísticos asociados a cualquier medición. Es por ello que usaremos pruebas de hipótesis para establecer hasta un cierto grado de certeza si una fuente presenta o no variabilidad en el periodo de observación.

Para hacer el análisis de las curvas de luz respecto a la variabilidad de todas las fuentes se siguieron los siguientes pasos:

1. Detectar y eliminar los valores atípicos (*outliers* en inglés) de los datos.
2. Convertir las magnitudes a flujos, incluyendo los errores respectivos.
3. Aplicar una prueba estadística para determinar si existe variabilidad intrínseca en las fuentes.
4. Estimar amplitud y escalas de variabilidad.

Cada uno de estos pasos se describe a detalle en las siguientes secciones.

3.2.2. Valores atípicos

Los valores atípicos, como su nombre lo indica, son observaciones que difieren significativamente del resto de los datos. Estas fluctuaciones representan un problema al hacer un análisis estadístico de un conjunto de datos.

Por esta razón, es necesario detectar y eliminar estas observaciones del conjunto de datos a analizar. Para esto, hay diversos métodos que se pueden seguir. En nuestro análisis usaremos uno de los métodos clásicos, descritos por ejemplo en Sarkar et al. (2019). En particular, los autores, para la banda del óptico utilizan un método que se adecua a nuestras observaciones.

Primero se toman las observaciones hechas utilizando el mismo filtro para una fuente dada. Para cada época se grafican las curvas de luz de cada blázar y se hace un ajuste lineal de los datos para estimar la desviación estándar σ , definida en (3.1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - (at_i + b))^2}, \quad (3.1)$$

donde N es el número de observaciones, m_i es la medición de la magnitud en el tiempo t_i , y a , b son la pendiente y ordenada al origen, respectivamente, del ajuste lineal a los datos.

De esta manera, se considera un outlier cuando tenemos un solo punto aislado cuyo flujo medido esta muy por encima de 3σ . Estos valores se quitaron de la curva de luz.

Dado que las observaciones hechas se pueden separar en tres épocas correspondientes a cada mes de observación, se hizo la identificación de valores atípicos para cada una de estas épocas.

Para hacer la detección se crearon las siguientes funciones en python que permiten identificar estos puntos solo dando las magnitudes y los tiempos en los que se realizaron las mediciones. Esta función se usó posteriormente para eliminar los valores atípicos de los datos.

Código 3.1: Código para hacer la identificación de los outliers. Se crearon dos funciones auxiliares, una calcula la pendiente y ordenada del ajuste lineal a los datos, y la otra obtiene la desviación estándar respecto al ajuste lineal anterior.

```
def min_cuad(x,y):
    n = len(x)
    x_a = np.array(x)
    y_a = np.array(y)
    sumxy = sum(x_a*y_a)
    sumx = sum(x_a)
    sumy = sum(y_a)
    sumx2 = sum(x_a*x_a)
    a = n*sumxy - sumx*sumy
    b = n*sumx2 - sumx**2
    c = sumx2*sumy - sumxy*sumx
    pend = a/b
    ordenada = c/b
    return [pend, ordenada]

def desv_stand_ajuste(x,y):
    n = len(x)
    x_a = np.array(x)
    y_a = np.array(y)
    estad = min_cuad(x_a,y_a)
    suma = sum((y_a-(estad[0]*x_a+estad[1]))**2)
    return (suma/n)**(1/2)

def outliers(x,y):
    estad = min_cuad(x,y)
    sigma = desv_stand_ajuste(x,y)
    indices = []
    for i in y.index:
        dist = abs(y[i]-estad[0]*x[i]-estad[1])
        if dist > 3*sigma:
            indices.append(i)
    return indices
```

3.2.3. Magnitudes a flujos

El flujo y la magnitud aparente de una fuente para una frecuencia ν dada están relacionadas por la siguiente expresión (ver Karttunen et al., 2017)

$$m_\nu = -2.5 \log_{10} \left(\frac{F_\nu}{F_{\nu,0}} \right), \quad (3.2)$$

$F_{\nu,0}$ es el *punto cero*, y este está asociado a la calibración y sistema fotométrico utilizados, pues se define como el valor de flujo para el que la magnitud m_ν es igual a cero.

De esta expresión podemos obtener el flujo en términos de la magnitud aparente, con lo que se obtiene la expresión

$$F_\nu = F_{\nu,0}10^{-0.4m_\nu}, \quad (3.3)$$

en donde basta conocer el valor del punto cero para la frecuencia (o longitud de onda) correspondiente para obtener el valor del flujo asociado a la magnitud m_ν .

Como ya se mencionó, los filtros utilizados para hacer las observaciones son los del sistema de Bessel calibrados al sistema de Johnson-Cousins, así que los puntos cero utilizados para hacer las conversiones de magnitudes a flujos son los que se enlistan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Punto cero asociado a cada filtro del sistema fotométrico de Johnson-Cousins. Se anexa además la longitud de onda efectiva asociada a cada filtro del sistema (obtenido de <https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/dataanalysis/tools/pet/magtojoy/>).

Filtro	F_0 (Jy)	λ_{eff} (nm)
B	4130	430
V	3781	550
R	2941	700
I	2635	900

A cada medición de la magnitud aparente también se le asoció su respectivo error, por lo que además es necesario convertir el error de la magnitud al error del flujo. Para esto, se utilizó propagación de errores usual en la ecuación (3.3), obteniendo la siguiente expresión para el error del flujo δF_ν

$$\delta F_\nu = 0.4 \ln(10) F_{\nu,0} 10^{-0.4m_\nu} \delta m_\nu \quad (3.4)$$

donde δm_ν es el error de la magnitud correspondiente.

Para realizar esta conversión entre magnitudes y flujos se creó la función en python del Código 3.2, la cual regresa el valor del flujo y el error respectivo en mJy.

Código 3.2: Código para convertir magnitud en flujo y obtener el error del flujo a partir del error de la magnitud.

```
def mag_to_flux(mag,mag_err,filtro):
    if filtro == 'B':
        F0 = 4130
    elif filtro == 'V':
        F0 = 3781
    elif filtro == 'R':
        F0 = 2941
    elif filtro == 'I':
        F0 = 2635
    else:
        print('Error: Filter unknown')
    F = F0 * 1000*10**(-0.4*mag)
    F_err = 0.4*1000*np.log(10)*F0*10**(-0.4*mag)*mag_err
    return [round(F,2), round(F_err,5)]
```


3.2.4. Prueba estadística

Para hacer un correcto análisis de los datos sin los valores atípicos hay que aplicar una prueba estadística, esta nos permite asegurar con cierto grado de confianza si las variaciones en el flujo, o magnitud, que se observan en la curva de luz son debidas a una variabilidad intrínseca de la fuente o, por el contrario, son producidas por algún error o efecto de las mediciones.

La prueba que se utilizó en este caso es una prueba χ^2 . Podemos describir esta prueba en el siguiente conjunto de pasos

1. Definimos la hipótesis nula de nuestra prueba, es decir, una afirmación en la que se propone lo contrario de lo que queremos mostrar. En este caso, la hipótesis nula es: *No hay variabilidad en la fuente.*
2. Damos un nivel de significancia, α . Este valor nos dice qué riesgo estamos dispuestos a correr de concluir que nuestra hipótesis nula es falsa, cuando en realidad es cierta. Tomamos $\alpha = 0.01$, es decir, estamos dispuestos a asumir un riesgo de 1 % de concluir que sí hay variabilidad cuando en realidad no la hay. Visto de otra forma, si concluimos que hay variabilidad con la prueba estadística, lo haremos con una certeza de 99 %.
3. Calculamos el estadístico χ^2 , que es un valor asociado a los datos y está dado por (ver Agarwal and Gupta, 2015)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_i - \bar{V})^2}{\epsilon_i^2}, \quad (3.5)$$

donde N es el número de observaciones, V_i es la medición i -ésima de la magnitud, \bar{V} es el promedio de las magnitudes y ϵ_i es el error de la medición i -ésima. Para obtener esta cantidad se creó la función en python mostrada en el Código 3.3.

4. Comparamos el valor obtenido en el paso anterior con un valor crítico que depende de los grados de libertad y de α . Los grados de libertad son el número de observaciones menos los parámetros libres, en este caso el único parámetro libre es el tiempo, así que los grados de libertad son $N - 1$. Estos valores críticos se encuentran descritos en tablas y se usa una para hacer la evaluación de la prueba.
5. Si el estadístico χ^2 calculado es mayor que el valor crítico decimos que la hipótesis nula es falsa, que en nuestro caso significa que la fuente sí presenta variabilidad, y esta conclusión tiene un 99 % de certeza. Para hacer esta prueba final se creó una función en python que calcula y hace la comparación de los valores, se muestra en el Código 3.4. Esta función devuelve `True` cuando la prueba concluye que sí hay variabilidad y `False` cuando no. Se agregó además una línea de código que permite importar la tabla con los valores críticos de χ^2 .

Código 3.3: Código para obtener el valor del estadístico χ^2 .

```
def chi2_mag(magnitudes, errores):
    chi2_f = 0
    M_mean = sum(magnitudes)/len(magnitudes)
    for i in range(len(magnitudes)):
        chi2_f += (magnitudes[i]-M_mean)**2 / (errores[i]**2)
    return chi2_f
```

Código 3.4: Código para hacer la prueba χ^2 . Nótese que se puede cambiar el valor de la significancia pero toma por defecto el valor 0.01

```
### Importar una tabla de valores criticos de chi2 para
### usar directamente en la prueba
chi2_critic_values = pd.read_csv("chi2.csv")

def test_chi2(magnitudes, errores, significance=0.01):
    mag = np.array(magnitudes)
    err = np.array(errores)
    dof = len(mag)-1
    chi2_calc = chi2_mag(mag, err)
    if chi2_calc > chi2_critic_values[str(significance)][dof-1]:
        return True
    else:
        return False
```

Esta prueba estadística se realizó para cada una de las fuentes, en cada uno de los filtros y en cada una de las tres épocas de observación. Dado que tenemos observaciones en 4 filtros muy cercanos en longitud de onda, se espera que el mecanismo físico que genera las variaciones sea esencialmente el mismo (ver Sarkar et al., 2019), por esta razón, para asegurar que una fuente presenta variabilidad, tenía que ocurrir que para al menos tres de los cuatro filtros la prueba concluyera que sí hay variabilidad.

3.2.5. Amplitud y escala de variabilidad

Para las fuentes en las que se determinó la presencia de variabilidad después de aplicar la prueba estadística se obtuvieron cantidades representativas del fenómeno de variabilidad. En primer lugar se determinó la amplitud de variabilidad (ver Heidt and Wagner, 1996)

$$A = \sqrt{(A_{\max} - A_{\min})^2 - 2\sigma^2}, \quad (3.6)$$

donde $A_{\max/\min}$ son el máximo y el mínimo, respectivamente, de la curva de luz en magnitudes y σ es el promedio de los errores de las observaciones.

Para obtener la amplitud de variabilidad de aquellas fuentes donde la prueba de χ^2 muestra que tienen variabilidad intrínseca se creó la siguiente función en python.

Código 3.5: Código para calcular la amplitud de variabilidad de una fuente que presenta variabilidad.

```
def amplitud_var_mag(magnitudes, errores):
    mag = np.array(magnitudes)
    err = np.array(errores)
```

```

A_max = max(mag)
A_min = min(mag)
error_mean = sum(err)/len(err)
return ((A_max-A_min)**2-2*error_mean**2)**(1/2)

```

Para determinar las escalas temporales de variabilidad de cada fuente en la muestra, primero calculamos la escala temporal de variabilidad para cada par de observaciones consecutivas. Para esto se utilizaron dos escalas diferentes, la primera de ellas resulta del formalismo propuesto por Burbidge et al. (1974) y se presenta en la siguiente ecuación

$$\tau = \frac{|t_2 - t_1|}{\ln(F_2/F_1)}, \quad (3.7)$$

donde F_2 y F_1 son los flujos medidos al tiempo t_2 y t_1 respectivamente, correspondientes a dos observaciones consecutivas, además, $F_2 > F_1$.

La segunda escala se estimó usando las *flux-doubling/halving timescales* (escalas temporales de duplicación/reducción a la mitad de flujo, t_d):

$$F(t_{i+1}) = F(t_i)2^{(t_{i+1}-t_i)/t_d}, \quad (3.8)$$

donde $F(t_i)$ es el flujo al tiempo t_i y t_d es la escala característica de duplicación de flujo (ver Foschini et al., 2011). Es la mínima escala de duplicación la que se utiliza para estimar la escala de variabilidad.

Es relevante notar que la diferencia entre estas dos escalas es simplemente la base que se utiliza para describir un crecimiento (o decrecimiento) exponencial en el flujo de la fuente. Se consideran ambas escalas en el estudio para hacer un análisis más completo de la muestra.

Con los valores encontrados para cada fuente de estas escalas se obtuvo la escala de variabilidad mínima, a partir de la cuál se puede determinar el tamaño de la región de emisión que produce esta variación.

Para obtener estas escalas se crearon las siguientes funciones en python. Cada una de ellas calcula todas las escalas de variabilidad con el formalismo correspondiente y posteriormente obtiene la mínima. Estas funciones solo aplican el formalismo correspondiente al pasarles un par de listas con los días de observación y los flujos observados, y con esto se determinan las escalas de variabilidad. Se usan condicionales para evitar resultados numéricos indeterminados.

Código 3.6: Código para calcular las escalas temporales mínima y máxima de una fuente que presenta variabilidad.

```

def escala_variabilidad(dias, flujos):
    taus = []
    dates = np.array(dias)
    flux = np.array(flujos)
    for i in range(len(dates)-1):
        F_2 = max(flux[i], flux[i+1])
        F_1 = min(flux[i], flux[i+1])
        if F_2 == F_1:
            continue
        tau = (dates[i+1] - dates[i]) / (np.log(F_2/F_1))

```

```

        taus.append(tau)
    if min(taus) == 0:
        taus.remove(0)
    return min(taus)

def min_doubling_timescale(dias, flujos):
    scales = []
    dates = np.array(dias)
    flux = np.array(flujos)
    for i in range(len(flujos)-1):
        F_2 = max(flux[i], flux[i+1])
        F_1 = min(flux[i], flux[i+1])
        if F_2 == F_1:
            continue
        scale = (dates[i+1]-dates[i])/np.log2(F_2/F_1)
        scales.append(scale)
    if min(scales) == 0:
        scales.remove(0)
    return min(scales)

```

3.3. SED, variabilidad de color y espectral

De cada uno de los objetos en la muestra se obtuvo la SED de diferentes noches, además se realizó un estudio de color para determinar el comportamiento de la fuente al aumentar su brillo y un análisis de la variabilidad del índice espectral durante las observaciones.

Recordando que ya se había realizado la detección y eliminación de valores atípicos en las observaciones realizadas, se siguieron los siguientes pasos para obtener estos resultados.

1. Detección de observaciones cuasi-simultáneas en un intervalo temporal de una noche.
2. Construcción de la SED para cada fuente con los datos del óptico.
3. Creación de diagramas color-magnitud con las observaciones cuasi-simultáneas. Se utilizaron cuatro índices de color diferentes: B-V, V-R, R-I y B-I.
4. Análisis de correlación para cada diagrama color-magnitud y clasificación del comportamiento de la fuente en RWB, BWB o ninguno, con base en los resultados del análisis.
5. Construcción de diagramas índice espectral-magnitud con los mismos datos y colores para obtener el índice espectral. Se hizo además un análisis de correlación análogo al anterior para la relación índice espectral-magnitud.
6. Construcción de diagramas para analizar la variación del índice espectral con el tiempo.

A continuación se detallan estos pasos y se describe la forma general de obtener los resultados buscados para las fuentes de la muestra.

3.3.1. Observaciones cuasi-simultáneas y SED con datos del óptico

La SED de los blázares es una herramienta necesaria para poder comparar distintos estados de actividad (ver Figura 3.2). Para realizar la construcción de las SED es necesario contar con observaciones simultáneas de la fuente en los diferentes filtros que se utilizaron. El problema mayor para obtener la SED en multifrecuencias o en bandas específicas, es obtener observaciones simultáneas con un mismo instrumento. Esto involucra obtener observaciones en tierra y de satélites, según la banda a analizar o todas las bandas si el estudio es en multifrecuencias. Es por esto que es necesario obtener observaciones *cuasi-simultáneas*, es decir, que ocurren en tiempos cercanos entre ellas.

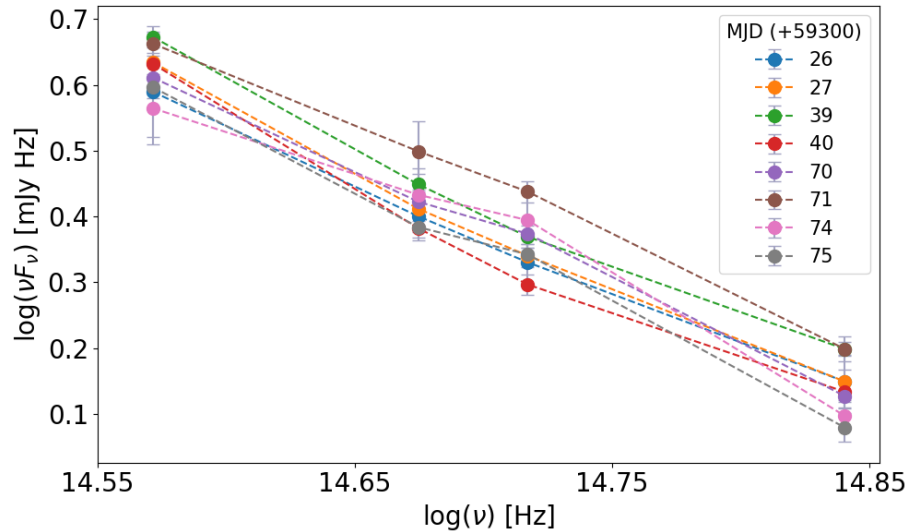


Figura 3.2: Este es un ejemplo de lo que se obtiene con el proceso descrito en esta sección. Se observa la SED de ON 231 en las bandas del óptico B, V, R e I, para diferentes épocas de observación, claramente se observa cómo varía dependiendo del MJD, y por tanto, del estado de actividad de la fuente.

Dado que las observaciones en nuestro trabajo son cuasi-simultáneas, es decir, los puntos se obtienen durante una misma noche, podemos obtener la SED por noche para hacer un estudio de variabilidad. Esto resulta en dos posibles casos para las observaciones de una noche: (1) que hubiera disponible una observación por cada filtro y (2) que hubiera más de una observación cuasi-simultánea (de la misma noche) para uno o más filtros. Dependiendo del caso se procede de una u otra forma para obtener el flujo correspondiente a cada filtro, o frecuencia.

En el primer caso, para cada filtro se tiene solo una observación por noche, con lo que se puede establecer una relación directa entre el flujo y la frecuencia tomando

los datos sin hacer modificaciones.

Para el segundo caso, en los filtros con más de una observación en la misma noche, se toma un promedio entre los diferentes valores del flujo y este es el que se utiliza para la SED, considerando la incertidumbre del flujo promedio como el máximo entre la desviación absoluta máxima de las observaciones y los errores de los flujos con los que se obtiene el promedio, con la desviación absoluta máxima dada por

$$\text{d.a.m.} = \text{máx}(|\bar{F} - F_i|), \quad (3.9)$$

donde F_i son los flujos de las observaciones cuasi-simultáneas que se promedian.

La detección de observaciones cuasi-simultáneas, así como la creación de un DataFrame que contuviera la información necesaria para graficar la SED de las fuentes se hizo con las siguientes funciones de python. En la Tabla 3.2 se muestra un ejemplo de las tablas generadas por la función `tablas_para_graficar`.

Código 3.7: Funciones para detectar observaciones cuasi-simultáneas de una tabla de datos para una fuente fija y para generar un DataFrame con los datos necesarios para construir las distribuciones espectrales de energía para cada época de observación.

```
# Recibe un dia para detectar cuasi simultaneidad
# en una lista de dias (mjd) con base en dia
def indices_observaciones_simultaneas(dia,mjd):
    indices_cuasi = []
    dia = int(dia)
    for i in mjd.index:
        if mjd[i] < dia+1 and mjd[i] >= dia:
            indices_cuasi.append(i)
    return indices_cuasi

# Regresa una lista, cada elemento de la lista es un DataFrame con
# observaciones ocurridas en la misma noche (MJD)
def detecta_simultaneas(tabla):
    tablas_simultaneas = []
    mjd = tabla['MJD']
    while len(mjd) > 0:
        indice = mjd.index[0]
        dia = mjd[indice]
        indices_cuasi = indices_observaciones_simultaneas(dia, mjd)
        new_df = tabla.loc[indices_cuasi]
        tablas_simultaneas.append(new_df)
        tabla = tabla.drop(indices_cuasi)
        mjd = tabla['MJD']
    return tablas_simultaneas

# Longitudes efectivas de los filtros
longitudes = {
    'B' : 4330E-10,
    'V' : 5750E-10,
    'R' : 6340E-10,
    'I' : 8040E-10
}
# Ancho de los filtros, en metros
```

```

anchos_banda_metros = {
    'B' : 950E-10,
    'V' : 1400E-10,
    'R' : 400E-10,
    'I' : 1660E-10
}
c = 299_792_458
filtros = ['B', 'V', 'R', 'I']
freq = []
anchos = []
for i in filtros:
    freq.append(c/longitudes[i])
    anchos.append(anchos_banda_metros[i] * c/longitudes[i]**2)
# Frecuencias efectivas en Hertz de cada filtro
frecuencias = dict(zip(filtros, freq))
# Anchos de banda en unidades de frecuencia
anchos_banda = dict(zip(filtros, anchos))

# Recibe una tabla de observaciones cuasi-simultaneas
# y crea un DataFrame con la informacion que se necesita
# para graficar la SED
def tablas_para_graficar(tabla):
    tab = pd.DataFrame(columns = [
        'Noche',
        'Freq',
        'Flux',
        'Flux_err',
        'Freq_log',
        'Flux_log',
        'Flux_log_err'
    ])
    for filtro in tabla['Filter'].unique():
        proof = extraer_por_filtro(filtro, tabla)
        flujos = proof['Flux'].values
        flujos_err = proof['Flux_err'].values
        if len(proof['MJD']) > 1:
            flux = sum(flujos)/len(flujos)
            flux_err = max(
                [abs(flux-flujo) for flujo in flujos]+
                flujos_err
            )
        else:
            flux = proof['Flux'][proof['Flux'].index[0]]
            flux_err = proof['Flux_err'][proof['Flux'].index[0]]
    tab = pd.concat([tab, pd.DataFrame({
        'Noche' : proof['MJD'][proof['Flux'].index[0]],
        'Freq' : frecuencias[filtro],
        'Flux' : flux*anchos_banda[filtro], # nuF_nu
        'Flux_err' : flux_err*anchos_banda[filtro],
        'Freq_log': np.log10(frecuencias[filtro]),
        'Flux_log': np.log10(flux),
        'Flux_log_err': (1/(flux*np.log(10)))*flux_err
    }, index=[0])], ignore_index=True)
    tab = tab.sort_values(by=['Freq'])

```

```
return tab
```

	Noche	Freq	Flux	Flux_err	Freq_log	Flux_log	Flux_log_err
2	59326.272990	372876191542288.562500	299324971431499.187500	55276576514356.109375	14.571565	0.589726	0.080202
0	59326.260860	472858766561514.187500	74981179808071.875000	4077225957733.343262	14.674731	0.400250	0.023615
1	59326.240740	521378187826086.937500	271660704474253.343750	22849965796899.828125	14.717153	0.330414	0.036529
3	59326.223300	692361334872979.125000	214184297473985.093750	9114225424424.902344	14.840333	0.149219	0.018481

Tabla 3.2: Ejemplo de las tablas generadas por el Código 3.7.

Las funciones `indices_observaciones_simultaneas` y `detecta_simultaneas` son las que sirven para encontrar en la tabla de observaciones de una fuente todas las observaciones que ocurren en una misma noche y crear una lista de tablas, donde cada tabla contiene las observaciones para una noche en particular. Por otro lado, la función `tablas_para_graficar` crea un `DataFrame`, a partir de una tabla con observaciones cuasi-simultáneas, en el que se encuentran la frecuencia efectiva de cada filtro y el flujo correspondiente según las observaciones de una noche, así como el error del flujo y los logaritmos de cada cantidad par construir la SED. El flujo y su error se agregaron en la tabla de observaciones original con lo descrito en la Sección 3.2.3.

Una vez que se tienen las tablas con los datos necesarios para la SED de la fuente, se grafica la información para generarla, cuidando que solo se grafiquen aquellos datos de los cuales se posea el flujo para los cuatro filtros del óptico utilizados para las observaciones. Esto se hizo con la siguiente función de python que grafica las SED de diferentes noches en un mismo gráfico, con lo que se puede apreciar como las distribuciones cambian a lo largo del tiempo.

Código 3.8: Función que realiza todo lo necesario para obtener las diferentes SED a partir de una tabla con todas las observaciones de una fuente.

```
# Funcion para graficar las SED dada la tabla de una fuente fija
# Grafica todas las SED de las observaciones cuasi-simultaneas
# en la misma grafica
def graficar_SED(tabla):
    plt.figure(figsize=[10,6])
    tablas_simultaneas = detecta_simultaneas(tabla)
    for tabla in tablas_simultaneas:
        if len(tabla['Filter'].unique()) >= 4:
            tab = tablas_para_graficar(tabla)
            epocas = tab['Noche'].values
            eti = int(min(epocas))-59300
            plt.errorbar(
                tab['Freq_log'],
                tab['Flux_log'],
                yerr = tab['Flux_log_err'],
                label = eti,
                fmt = 'o--',
                ecolord = '#a3a3c2',
                markersize = 10,
                capsized = 5
            )
    size = 20
```



```

plt.xlabel(r"$\log(\nu)$" + " [Hz]", fontsize=size)
plt.ylabel(r"$\log(\nu F_\nu)$" + " [mJy Hz]", fontsize=size)
plt.tick_params(axis='both', labelsize=size)
plt.xticks([14.55, 14.65, 14.75, 14.85])
plt.ticklabel_format(useOffset=False, style='plain')
plt.tight_layout()
plt.legend(
    fontsize=size-5, title='MJD (+59300)', title_fontsize=size-5
)
name = tabla["Short_name"].values[0]
plt.savefig(
    "D:/Documentos/Tesis/AnálisisDatos/SEDs/"+name+"_SED.png"
)
plt.show()

```

3.3.2. Diagramas color-magnitud

Los diagramas color-magnitud son gráficas generadas a partir de observaciones en dos filtros de un sistema fotométrico, la idea de estos diagramas es encontrar relaciones entre un índice de color, dado por los dos filtros, y el estado de actividad de la fuente, que puede ser representado por una de las magnitudes que forman el índice de color. Este tipo de diagramas nos permiten encontrar relaciones entre el color de una fuente y su estado de actividad, es decir, si se ven más o menos brillantes.

Para obtener los diagramas color-magnitud de cada una de las fuentes se utilizaron las observaciones cuasi-simultáneas que se obtienen con las primeras funciones que se presentan en el Código 3.7. Las gráficas de interés se crearon a partir de DataFrames con la información necesaria para obtener los diagramas. Estos se obtuvieron de los datos utilizando la función en python del Código 3.9. La información en el DataFrame y cómo se obtiene se explica en los párrafos posteriores al código. En la Tabla 3.3 se muestra un ejemplo de la información que hay en los DataFrames generados por esta función.

Código 3.9: Función para obtener un DataFrame con la información que se necesita para generar el diagrama color-magnitud, dados dos filtros que definen el índice de color y uno más que sirve como variable independiente en el diagrama.

```

# tab es un DataFrame con las observaciones de una fuente
# fija
# filtro1 y filtro2 son cadenas que indican el índice
# de color a usar: filtro1 - filtro2
# filtro_x indica la magnitud a usar como
# variable independiente
def tabla_color_mag(tab, filtro1, filtro2, filtro_x):
    tabla_nueva = pd.DataFrame(columns = [
        'Noche',
        'x',
        'x_err',
        'Color_index',
        'Color_index_err'
    ])
    # Obtenemos las tablas con las observaciones

```

```

# cuasi-simultaneas
tablas_simultaneas = detecta_simultaneas(tab)
for tabla in tablas_simultaneas:
    if len(tabla['Filter'].unique()) >= 2:
        epoca = int(tabla.MJD.values[0])
        proof1 = extraer_por_filtro(filtro1, tabla)
        proof2 = extraer_por_filtro(filtro2, tabla)
        proof3 = extraer_por_filtro(filtro_x, tabla)
        if (len(proof1['MJD'].values) == 0)\
            or (len(proof2['MJD'].values) == 0)\
            or (len(proof3['MJD'].values) == 0):
            continue
        # Tomar el pormedio de la magnitud en caso
        # de que haya mas de una por noche
        if len(proof1['Mag'].values) > 1:
            mags1 = proof1['Mag'].values
            mag1 = sum(mags1)/len(mags1)
            mag1_err = max(
                [abs(mag1-mag) for mag in mags1]+\
                [err for err in proof1['Mag_error'].values]
            )
        else:
            mag1 = proof1['Mag'].values[0]
            mag1_err = proof1['Mag_error'].values[0]
        if len(proof2['Mag'].values) > 1:
            mags2 = proof2['Mag'].values
            mag2 = sum(mags2)/len(mags2)
            mag2_err = max(
                [abs(mag2-mag) for mag in mags2]+
                [err for err in proof2['Mag_error'].values]
            )
        else:
            mag2 = proof2['Mag'].values[0]
            mag2_err = proof2['Mag_error'].values[0]
        if len(proof3['Mag'].values) > 1:
            Xs = proof3['Mag'].values
            x = sum(Xs)/len(Xs)
            x_err = max(
                [abs(x-mag) for mag in Xs]+
                proof3['Mag_error'].values
            )
        else:
            x = proof3['Mag'].values[0]
            x_err = proof3['Mag_error'].values[0]
        color = mag1-mag2
        color_err = (mag1_err**2 + mag2_err**2)**0.5
        tabla_nueva = pd.concat([tabla_nueva,pd.DataFrame({
            'Noche' : epoca,
            'x' : x,
            'x_err' : x_err,
            'Color_index' : color,
            'Color_index_err' : color_err
        },index=[0])],ignore_index=True)
return tabla_nueva

```

	Noche	x	x_err	Color_index	Color_index_err
0	59326	15.620000	0.090000	0.546667	0.058310
1	59327	15.595000	0.045000	0.575000	0.080623
2	59328	15.620000	0.040000	0.710000	0.064031
3	59336	15.405000	0.045000	0.595000	0.064031
4	59337	15.375000	0.045000	0.465000	0.050000

Tabla 3.3: Ejemplo de las tablas generadas por el código 3.9.

El índice de color para dos bandas de un mismo filtro está definido como (ver Binney and Merrifield, 1998)

$$C.I._{AB} = m_A - m_B = \text{const} - 2.5 \log \frac{\int_0^\infty d\lambda S_\lambda(A) f_\lambda}{\int_0^\infty d\lambda S_\lambda(B) f_\lambda} \quad (3.10)$$

donde S_λ denota la sensibilidad combinada del sistema telescopio-detector-filtro y f_λ el flujo recibido en el sistema en la longitud de onda λ . Pero basta conocer las magnitudes en los filtros con los que se construye el índice de color para determinarlo.

En el DataFrame que se genera con la función del Código 3.9 se encuentran la noche a la que está asociada cada observación, el valor para la magnitud en el `filtro_x`, junto a su error, el valor del color dado por `filtro1-filtro2` para cada noche y el error asociado a dicho índice de color dado por

$$\sigma_{\text{filtro1-filtro2}} = \sqrt{\sigma_{\text{filtro1}}^2 + \sigma_{\text{filtro2}}^2}. \quad (3.11)$$

Los valores de la magnitud y errores para cada noche se calculan de manera similar a los flujos para las SED, es decir, se consideran dos casos: (1) las noches en las que para cada magnitud hay una observación y (2) las noches en las que para alguna de las magnitudes hay más de una observación.

Para construir los diagramas color-magnitud se creó una función en python que grafica la información que se obtiene de la función dada en el Código 3.9. La función hace las gráficas para un índice de color dado contra una magnitud dada de todas las fuentes disponibles en la muestra, toma todos los puntos posibles de cada fuente en la que al menos exista la información cuasi-simultánea en dos diferentes filtros. En estas gráficas además se agrega la recta que mejor ajusta a los datos mostrados en los diagramas. Las funciones para obtener el ajuste lineal y la gráfica se presentan en el Código 3.10.

Código 3.10: Funciones para obtener el ajuste lineal de un conjunto de datos por mínimos cuadrados, y graficar los diagramas color-magnitud de las fuentes.

```
# Funcion generica para obtener un ajuste lineal, con sus
# incertidumbres de un conjunto de datos con incertidumbres
def min_cuad_con_incertidumbres(x,y,dx):
    n = len(x)
    x_arr = np.array(x)
    y_arr = np.array(y)
    dx_arr = np.array(dx)
```

```

sumxy = (x_arr*y_arr).sum()
sumx2 = (x_arr**2).sum()
sumx = x_arr.sum()
sumy = y_arr.sum()
epsilon = max(dx_arr)

a = n*sumxy - sumx*sumy
d = n*sumx2 - sumx**2
f = sumx2*sumy - sumxy*sumx
m = a/d
b = f/d
if n <= 2:
    deltam = 0
    deltab = 0
else:
    deltam = epsilon*(n/d)**0.5
    deltab = epsilon*(1/n)**0.5
return m,b,deltam,deltab

def ajuste_lineal_color_mag(tabla):
    mag_x = tabla['x'].values
    color = tabla['Color_index'].values
    mag_x_err = tabla['x_err'].values
    ajuste = min_cuad_con_incertidumbres(
        mag_x,
        color,
        mag_x_err
    )
    return ajuste

names = [
    'oj287',
    's0954',
    'on231',
    '3c273',
    '3c279',
    'p1510',
    'da406',
    'mk501',
    'bllac'
]

# Funcion para graficar el diagrama color-magnitud
# para un indice de color dado de todas las fuentes
# en la muestra
def diagrama_color_mag(filtro1,filtro2,filtro_x,tabla=new_datos):
    fig, axs = plt.subplots(3,3)
    posiciones = [
        (0,0),(0,1),(0,2),(1,0),(1,1),(1,2),(2,0),(2,1),(2,2)
    ]
    size = 18
    for i in range(len(names)):
        tab = tabla_color_mag(
            extraer_por_nombre(names[i], tabla),
            filtro1,

```

```

        filtro2,
        filtro_x
    )
    axs[posiciones[i]].errorbar(
        tab['x'],
        tab['Color_index'],
        xerr = tab['x_err'],
        yerr = tab['Color_index_err'],
        fmt = 'dk',
        ecolore = '#a3a3c2',
        barsabove = False,
        markersize = 10,
        capsizel = 5,
    )
    axs[posiciones[i]].set_title(
        nombres_largos[names[i]],
        loc = 'center',
        y = 0.9,
        fontsize = size
    )
    x = np.linspace(min(tab['x']),max(tab['x']),10)
    m,b,dm,db = ajuste_lineal_color_mag(tab)
    axs[posiciones[i]].plot(
        x,
        m*x+b,
        color = 'r'
    )
for ax in axs.flat:
    ax.set(
        xlabel = filtro_x+' (mag)',
        ylabel = filtro1+'-' +filtro2+' (mag)'
    )
    ax.xaxis.label.set_size(size)
    ax.yaxis.label.set_size(size)
    ax.tick_params(labelsize=size)
    xlims = ax.get_xlim()
    rango = xlims[1]-xlims[0]
    ax.xaxis.set_ticks(
        [round(rango*i/3+xlims[0],3) for i in range(0,4)]
    )
fig.set_figheight(13)
fig.set_figwidth(15)
fig.tight_layout()
plt.subplots_adjust(wspace=0.3)
name = filtro1+'-' +filtro2
plt.savefig(
    "D:/Documentos/Tesis/AnálisisDatos/DiagramasCM/"
    +name
    +".png"
)
plt.show()

```

3.3.3. Análisis de correlación

Para realizar el análisis de correlación sobre los datos representados en los diagramas de color-magnitud es necesario utilizar los puntos que se muestran en dichos diagramas, de manera que el primer paso es obtener las mismas tablas que se usaron para generar los diagramas, esto se hizo con la función descrita en el Código 3.9.

El análisis de correlación se hizo utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, con su respectivo error. Para obtener este coeficiente se utilizó la librería `pingouin` de python, que implementa diferentes métodos estadísticos, en particular permite hacer estudios de correlación a través de diferentes coeficientes, entre ellos el de Pearson.

La función utilizada para hacer el análisis de correlación da como salida diferentes parámetros asociados al conjunto de datos sobre el que se ejecuta el análisis, entre ellos el coeficiente de correlación, el intervalo de confianza, y el p -value asociado al índice, también indica el número de puntos con los que se realiza el análisis. Cabe aclarar que el p -value representa la probabilidad de que la hipótesis nula planteada sea verdadera, donde la hipótesis nula es que no existe correlación en los datos, así que lo que se busca es que el p -value sea lo menor posible.

Con la función de python del Código 3.12, dados una serie de filtros que indican el índice de color y la magnitud contra la que se grafica, se genera una tabla que contiene: 1) el nombre de la fuente para la que se hace el análisis, 2) el intervalo temporal de observaciones (ΔT), 3) la pendiente del ajuste lineal del diagrama color-magnitud, con su respectivo error, 4) el coeficiente de correlación de Pearson y su error, 5) el p -value asociado a este coeficiente, 6) el número de observaciones cuasi-simultáneas (o número de datos) con las que se hace el análisis de correlación, 7) el índice espectral promedio, con su error y 8) el comportamiento que se puede asociar según los resultados del análisis de correlación, donde una correlación negativa con $r < -0.2$ y $p < 0.01$ indica un comportamiento RWB, mientras que una correlación positiva con $r > 0.2$ y $p < 0.01$ indica un comportamiento BWB (ver Li et al., 2018).

La caracterización de los comportamientos a partir del coeficiente de correlación se da de esta manera ya que se toman índices de color tales que el filtro más rojo se resta del más azul, así que entre mayor sea el índice de color se tiene que la fuente emite más en la banda más roja (o menos en la banda más azul).

El error del coeficiente de correlación se calcula usando el error probable del coeficiente de correlación, definido como

$$\text{P. E. } r = 0.6745 \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}}. \quad (3.12)$$

Para obtener el índice espectral promedio se parte de la suposición de que el flujo sigue una ley de potencias, es decir, $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, donde α es el índice espectral que se obtiene como parte del análisis de correlación. Sabemos por otro lado cómo se relacionan la magnitud y el flujo de una fuente. Si tomamos entonces un índice de color, dado por la diferencia entre dos magnitudes de un sistema fotométrico, y utilizando la ecuación (3.3) tendremos que dicho índice de color será

$$m_{\nu_1} - m_{\nu_2} = -2.5 \log_{10} \left(\frac{F_{\nu_1}}{F_{\nu_2}} \right),$$

al sustituir la ley de potencias para el flujo obtenemos

$$m_{\nu_1} - m_{\nu_2} = 2.5\alpha_{\nu_1\nu_2} \log_{10} \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} \right),$$

de donde podemos despejar el índice espectral $\alpha_{\nu_1\nu_2}$, para encontrar finalmente la expresión (ver Wiercholska et al., 2015)

$$\langle \alpha_{\nu_1\nu_2} \rangle = \frac{0.4 \langle m_{\nu_1} - m_{\nu_2} \rangle}{\log_{10}(\nu_1/\nu_2)}, \quad (3.13)$$

donde ν_1 y ν_2 son las frecuencias efectivas de las bandas respectivas (ver Bessell et al., 1998) y $\langle m_{\nu_1} - m_{\nu_2} \rangle$ es el índice de color promedio. Mientras que el error se obtiene a partir de la desviación absoluta máxima de los índices de color, o del error mayor entre los índices de color, multiplicando por las constantes respectivas. Este índice se obtiene con la siguiente función de python, que es utilizada en la función descrita en el Código 3.12.

Código 3.11: Función para obtener el índice espectral promedio y su error dada una lista con los índices de color, una con los errores de esos índices y una más con las frecuencias de las bandas que determinan el índice de color.

```
def indice_espectral_promedio(colores, colores_err, frecuencias):
    color_ind_prom = np.mean(colores)
    indice_promedio = 0.4*color_ind_prom/\
        np.log(frecuencias[0]/frecuencias[1])
    err_ind = max(
        [abs(x-color_ind_prom) for x in colores]
        +list(colores_err)
    )
    err_ind = 0.4*err_ind/np.log(frecuencias[0]/frecuencias[1])
    return indice_promedio, err_ind
```

Código 3.12: Función para realizar un análisis de correlación de un diagrama color-magnitud dado por los parámetros que recibe la función. Recibe además dos parámetros extra que determinan la sensibilidad para determinar si se puede concluir algún tipo de correlación o no.

```
def correlacion_ind_color(f1, f2, f_x, p_cut=0.01, r_cut=0.2):
    redondeo = 2
    tabla = new_datos
    for i in range(len(names)):
        eti = 'pearson'
        nombre = nombres_largos[names[i]]
        proof = extraer_por_nombre(names[i], tabla)
        deltaT = int(max(proof['MJD'])) - int(min(proof['MJD']))
        tab = tabla_color_mag(proof, f1, f2, f_x)
        if len(tab['Color_index'].values) <= 1:
            continue
        else:
            S, b, dS, db = ajuste_lineal_color_mag(tab)
            S, dS = round(S, redondeo), round(dS, redondeo)
```

```

df = pg.corr(
    tab['x'],
    tab['Color_index'],
    method=eti
)
r = round(df['r'][eti],redondeo)
obs = df['n'][eti]
dr = 0.6745*(1-r**2)/(obs**0.5)
dr = round(dr,redondeo)
pvalue = df['p-val'][eti]
ind_esp,dind = indice_espectral_promedio(
    tab['Color_index'],
    tab['Color_index_err'],
    [frecuencias[f1],frecuencias[f2]]
)
ind_esp = round(ind_esp,redondeo)
dind = round(dind,redondeo)
if (r > r_cut) & (pvalue < p_cut):
    comportamiento = 'BWB'
elif (r < -r_cut) & (pvalue < p_cut):
    comportamiento = 'RWB'
else:
    comportamiento = 'None'
if pvalue < 1/100:
    pvalue = format(pvalue, '.1E')
else:
    pvalue = round(pvalue,redondeo)
print(
    nombre, '&',
    str(deltaT), '&',
    str(S), '('+str(dS)+')', '&',
    str(r), '('+str(dr)+')', '&',
    str(pvalue), '&',
    str(obs), '&',
    str(ind_esp), '('+str(dind)+')', '&',
    comportamiento
)

```

La pendiente del ajuste y el error de la misma se obtienen con la función definida en el Código 3.10, que hace las estimaciones con el método de mínimos cuadrados.

3.3.4. Estimación de variabilidad de índice espectral

Queremos, por último, analizar la variabilidad del índice espectral, hay dos maneras de hacer esto. Por un lado podemos ver cómo varía el índice respecto al día de observación, es decir, su variación a lo largo del tiempo. La segunda opción es estudiar la variación del índice espectral con respecto al estado de actividad de la fuente, es decir, si se encuentra en un estado más brillante o menos.

Para hacer un estudio con ambas perspectivas se creó la siguiente función en python, que permite elegir el tipo de gráfica que se desea hacer, ya sea graficar contra el día juliano modificado o contra alguna magnitud. Se usa la función para obtener los DataFrames para el diagrama color-magnitud definida en el Código 3.9. Hay que

notar que es necesario dar un parámetro para `fx` aunque la gráfica que se quiera obtener sea contra MJD.

Código 3.13: Funciones para generar las gráficas de índice espectral contra el día juliano modificado o una magnitud.

```

# colores es una lista con los valores de indice
# de color para obtener el indice espectral
# frecuencias es una lista con las frecuencias de
# los filtros usados para obtener el color
# el orden de las frecuencias sigue el orden
# de los filtros para obtener el indice de color
def indice_espectral(colores, colores_err, frecuencias):
    indices = []
    indices_err = []
    for i in range(len(colores)):
        indice = 0.4*colores[i]/np.log(frecuencias[0]/frecuencias[1])
        error = 0.4*colores_err[i]/np.log(frecuencias[0]/frecuencias[1])
        indices.append(indice)
        indices_err.append(error)
    return indices, indices_err

def ajuste_lineal_esp_mag(tabla, frecuencias):
    mag_x = tabla['x'].values
    mag_x_err = tabla['x_err'].values
    color = tabla['Color_index'].values
    color_err = tabla['Color_index_err'].values
    indices, ind_err = indice_espectral(color, color_err, frecuencias)
    ajuste = min_cuad_con_incertidumbres(
        mag_x,
        indices,
        mag_x_err
    )
    return ajuste

# Funcion para graficar los indices espectrales
# vs MJD o mag para ver su variacion
def graficar_ind_esp(f1, f2, fx, tabla=new_datos, MJD=True):
    fig, axs = plt.subplots(3,3)
    posiciones = [
        (0,0), (0,1), (0,2), (1,0), (1,1), (1,2), (2,0), (2,1), (2,2)
    ]
    size = 18
    for i in range(len(names)):
        tab = tabla_color_mag(
            extraer_por_nombre(names[i], tabla),
            f1,
            f2,
            fx
        )
        indices, err = indice_espectral(
            tab['Color_index'].values,
            tab['Color_index_err'].values,
            [frecuencias[f1], frecuencias[f2]]

```

```

)
if MJD:
    x = np.array(tab['Epoca'].values)-59300
    xerr = np.zeros(len(tab['Epoca'].values))
    xlab = 'MJD (+59300)'
    eti = 'MJD'
else:
    x = np.array(tab['x'].values)
    xerr = np.array(tab['x_err'].values)
    xlab = fx+' (mag)'
    eti = 'mag'
axs[posiciones[i]].errorbar(
    x,
    indices,
    xerr = xerr,
    yerr = err,
    fmt = 'dk',
    ecolor = '#a3a3c2',
    barsabove = False,
    markersize = 10,
    capsize = 5
)
axs[posiciones[i]].set_title(
    nombres_largos[names[i]],
    loc = 'center',
    y = 0.9,
    fontsize = size
)
if not MJD:
    x = np.linspace(min(tab['x']),max(tab['x']),10)
    m,b,dm,db = ajuste_lineal_esp_mag(
        tab,
        [frecuencias[f1],frecuencias[f2]]
    )
    axs[posiciones[i]].plot(
        x,
        m*x+b,
        color = 'r'
    )
    if len(indices)<=2:
        ax = axs[posiciones[i]]
        xl = ax.get_xlim()
        rang = xl[1]-xl[0]
        ticks = [
            round(rang*i/2+xl[0],3) for i in range(0,3)
        ]
        ax.xaxis.set_ticks(ticks)
for ax in axs.flat:
    ax.set(
        xlabel = xlab,
        ylabel = r"$\alpha_{"+f1+f2+"}$"
    )
ax.xaxis.label.set_size(size)
ax.yaxis.label.set_size(size)

```

```

    ax.tick_params(labelsize = size)
fig.set_figheight(13)
fig.set_figwidth(15)
plt.tight_layout()
plt.subplots_adjust(wspace=0.3)
name = tabla["Short_name"].values[0]
plt.savefig(
    "D:/Documentos/Tesis/AnalisisDatos/SpecVar/"
    + f1
    + f2
    + 'vs'
    + eti
    + ".png"
)
plt.show()

```

El parámetro MJD de la función `graficar_ind_esp` es el que indica si queremos graficar contra día juliano modificado o contra magnitud, cuando es igual a `True` se grafica contra MJD, si es `False` se hace la gráfica contra magnitud.

En el caso de que la gráfica elegida sea contra magnitud se agrega una línea de tendencia para los datos, obtenida con la función `ajuste_lineal_esp_mag`, que realiza un ajuste por mínimos cuadrados y devuelve los valores de la pendiente y ordenada al origen, así como sus errores.

Se agrega además la función `indice_espectral`, esta genera dos listas, una con el valor del índice espectral para cada índice de color y la otra con el error respectivo a los índices espectrales. El índice espectral se calcula con una ecuación equivalente a la ecuación (3.13) pero en este caso sin tomar el promedio para el índice, es decir,

$$\alpha_{\nu_1\nu_2} = \frac{0.4(m_{\nu_1} - m_{\nu_2})}{\log_{10}(\nu_1/\nu_2)}, \quad (3.14)$$

donde ν_1 y ν_2 son las frecuencias efectivas de las bandas respectivas (ver Bessell et al., 1998) y $m_{\nu_1} - m_{\nu_2}$ es el índice de color respectivo a cada observación.

Se hizo también un análisis de correlación para los diagramas índice espectral contra magnitud, con la información equivalente del que se hizo para los diagramas color-magnitud. Para hacer una interpretación correcta de los resultados de este análisis es necesario recordar que la ley de potencias planteada para la obtención de los índices espectrales está dada por

$$F_\nu \propto \nu^{-\alpha}, \quad (3.15)$$

donde α es el índice espectral correspondiente que se calcula con la ecuación (3.14).

De la ecuación anterior concluimos que el espectro se aplanar cuando el valor del índice espectral, α , tiende a cero; y que estará más inclinado al tomar valores cuyo valor absoluto tienda a crecer.

Trasladando esta información al diagrama índice espectral contra magnitud, tenemos que en el caso de una correlación positiva la fuente presenta un comportamiento *flatter when brighter* (FWB), es decir, el espectro tiende a aplanarse cuando la fuente se hace más brillante. Por otro lado, si la correlación es negativa diremos que el comportamiento es *steeper when brighter* (SWB), que significa que el espectro de la fuente

tiene una mayor pendiente cuando se abrillanta. Hay que notar que este análisis solo es válido mientras el índice espectral sea mayor a cero.

Es importante resaltar que estos comportamientos son considerando dos filtros, que sería equivalente a estudiar el comportamiento de la SED considerando solo dos puntos, que son los respectivos a los dos filtros con los que se obtiene el índice de color. Con esto tenemos que el comportamiento que se analiza es por segmentos de la SED, y no un comportamiento global en el óptico, para hacer esto habría que considerar una serie de puntos para obtener un índice espectral, lo que implicaría hacer un ajuste lineal a la SED y a partir de la pendiente determinar un posible índice espectral.

El análisis de correlación descrito anteriormente, así como la obtención de información del mismo, se realizaron utilizando los siguientes códigos en python. La información que se obtiene es la misma que en el caso de los diagramas color-magnitud, por lo que la forma de obtenerla es la misma. En estos resultados no se presenta el índice espectral promedio.

Código 3.14: Funciones para realizar un análisis de correlación entre el índice espectral y la magnitud de la fuente e imprimir los resultados.

```
def correlacion_ind_esp(f1,f2,fx,p_cut=0.01,r_cut=0.2):
    redondeo = 2
    tabla = new_datos
    for i in range(len(names)):
        eti = 'pearson'
        nombre = nombres_largos[names[i]]
        proof = extraer_por_nombre(names[i], tabla)
        deltaT = int(max(proof['MJD'])-min(proof['MJD']))
        tab = tabla_color_mag(proof, f1, f2, fx)
        if len(tab['Color_index'].values) <= 1:
            continue
        else:
            colores = tab['Color_index'].values
            colores_err = tab['Color_index_err'].values
            freqs = [frecuencias[f1],frecuencias[f2]]
            S,_,dS,_ = ajuste_lineal_esp_mag(
                tab,
                freqs
            )
            S,dS = round(S,redondeo),round(dS,redondeo)
            indices,_ = indice_espectral(colores,colores_err,freqs)
            df = pg.corr(
                tab['x'],
                indices,
                method = eti
            )
            r = round(df['r'][eti],redondeo)
            obs = df['n'][eti]
            dr = 0.6745*(1-r**2)/(obs**0.5)
            dr = round(dr,redondeo)
            pvalue = df['p-val'][eti]
            if (r > r_cut) & (pvalue < p_cut):
                comportamiento = 'FWB'
            elif (r < -r_cut) & (pvalue < p_cut):
```

```

        comportamiento = 'SWB'
    else:
        comportamiento = 'None'
    if pvalue < 1/100:
        pvalue = format(pvalue, '.1E')
    else:
        pvalue = round(pvalue, redondeo)
    print(
        nombre, '&',
        str(deltaT), '&',
        str(S), '(' + str(dS) + ')', '&',
        str(r), '(' + str(dr) + ')', '&',
        str(pvalue), '&',
        str(obs), '&',
        comportamiento
    )

```

Por otro lado, para las gráficas de índice espectral contra MJD se realizó una prueba de variabilidad equivalente a lo hecho con las curvas de luz y descrito en las secciones 3.2.4 y 3.2.5. Se aplicó la misma prueba χ^2 ahora usando los índices espectrales y sus errores para calcular el estadístico, y se consideró la prueba con los mismos criterios que lo descrito en las secciones mencionadas. En este caso la prueba se hizo considerando las observaciones en todo el periodo de observación, es decir, no se dividió en tres periodos de observación a los datos.

Para las fuentes en las que la prueba daba como resultado `True` se decidió calcular la amplitud de variabilidad del índice espectral usando una ecuación equivalente a la ecuación (3.6)

$$A = \sqrt{(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})^2 - 2\sigma^2}, \quad (3.16)$$

donde $\alpha_{\max/\min}$ son el máximo y el mínimo, respectivamente, de los valores que toma el índice espectral y σ es el promedio de los errores de los índices espectrales. Esta ecuación es propuesta por nosotros pues el objetivo es determinar la máxima variación del índice espectral en el periodo de observación, tomando en cuenta el error de los valores del índice, por esto es que se propone una ecuación equivalente a la utilizada para la amplitud de variabilidad en las curvas de luz.

El estadístico χ^2 para el índice espectral y la amplitud de variabilidad, en los casos en que se encontrara variabilidad, se calcularon con las siguientes funciones de python. Mientras que la prueba de hipótesis se realizó con la misma función usada para el caso de las curvas de luz y que se encuentra en el Código 3.4.

Código 3.15: Funciones para obtener el estadístico χ^2 asociado a los índices espectrales y obtener la amplitud de variabilidad del índice espectral.

```

def chi2_ind_esp(indices, errores):
    chi2_ind = 0
    ind_mean = sum(indices)/len(indices)
    for i in range(len(indices)):
        chi2_ind += (indices[i]-ind_mean)**2 / (errores[i]**2)
    return chi2_ind

def amplitud_var_ind(indices, errores):

```

```
index = np.array(indices)
err = np.arrayerrores)
ind_max = max(index)
ind_min = min(index)
error_mean = sum(err)/len(err)
return round(((ind_max-ind_min)**2-2*error_mean**2)**(1/2),2)
```

Capítulo 4

Análisis de resultados

Los procesos descritos en los capítulos anteriores se aplicaron a cada blázar de la muestra, los resultados obtenidos para el análisis de las curvas de luz y la detección de variabilidad en el flujo de las fuentes se describen en la sección 4.1; mientras que los resultados del estudio de variabilidad de color y de índice espectral se encuentran en la sección 4.2.

A lo largo de este capítulo se puede notar que para algunos de los objetos la cantidad de observaciones es menor que para otros. Esto está asociado a diferentes problemas, por un lado, algunas de las fuentes no fueron visibles durante las noches de observación de abril o mayo, por ejemplo, BL Lacerta. Por otro lado, en el caso particular de DA 406, la lejanía hace que no siempre se puedan obtener observaciones adecuadas.

Durante las observaciones, para algunas de las fuentes se tomaron dos o tres observaciones consecutivas utilizando el mismo filtro antes de hacer los cambios de filtro, esto se hace evidente en, por ejemplo, la Figura 4.2a. Esto se hizo con el objetivo de tener varias observaciones para una misma noche y así analizar mediante promedios el comportamiento espectral de las fuentes.

4.1. Variabilidad de flujo en las curvas de luz

Se construyeron primero las curvas de luz históricas para cada una de las fuentes, es decir, un curva de luz con toda la información obtenida de las observaciones, sin considerar los valores atípicos detectados.

El análisis de variabilidad se hizo para cada uno de los filtros individualmente, así como para cada una de las épocas de observación correspondientes a los meses de abril, mayo y junio del 2021. Para esto se construyeron también las curvas de luz correspondientes a cada una de las épocas mencionadas. Los días de observación en cada época varían para cada fuente, así como el número de observaciones disponibles. En los resultados se presentan los días mínimo y máximo de las observaciones correspondientes.

Es importante notar que para poder realizar un análisis de la fuente es necesario que existan al menos dos puntos en la curva de luz para una misma época y un mismo

filtro, de otra manera, no se pueden realizar los ajustes, tampoco obtener la amplitud o escalas de variabilidad. Por otro lado, entre mayor sea la cantidad de puntos que se tienen para una fuente la estadística será mejor, dado que la cantidad de puntos que se presentan en este trabajo es pequeña los resultados presentados, respecto a la variabilidad de flujo, deben tomarse con cautela. Sin embargo, para el análisis de la variabilidad espectral, dado que se contemplan todas las observaciones para cada fuente, los resultados presentados son una aportación relevante al estudio del comportamiento de las fuentes que se pueden complementar con más observaciones de esta época para llegar a resultados con mayor significancia estadística.

En las curvas de luz que se muestran para cada una de las fuentes los colores corresponden a los filtros como sigue: naranja para el filtro I, rojo para el filtro R, verde para el filtro V y azul para el filtro B.

OJ 287

En las curvas de luz de OJ 287 (Figura 4.1) observamos una disminución en el brillo en los cuatro filtros para los últimos días de observación.

Para abril solo se tienen observaciones de una noche, por lo que no podemos estudiar STV para este mes, así que estos resultados se omiten. Sin embargo, se muestran las curvas de luz en los cuatro filtros para esta noche en la Figura 4.2a.

Para el caso de las noches de mayo se observa una tendencia decreciente de la magnitud en las 4 noches de observación en la Figura 4.2b. Al hacer el análisis de variabilidad para estos puntos tenemos que en los filtros B, V y R se presenta variabilidad, con una amplitud máxima en la banda B de 0.32 magnitudes y una amplitud de 0.31 magnitudes para los filtros V y R. Dado que se presenta esta variabilidad en tres de los cuatro filtros concluimos que sí hay presencia de STV en el óptico para OJ 287 en este periodo.

Respecto a la mínima escala de variabilidad, tenemos que esta varía dependiendo del filtro, con un mínimo para el filtro R, donde se tiene una escala mínima de variabilidad de 0.00011 días.

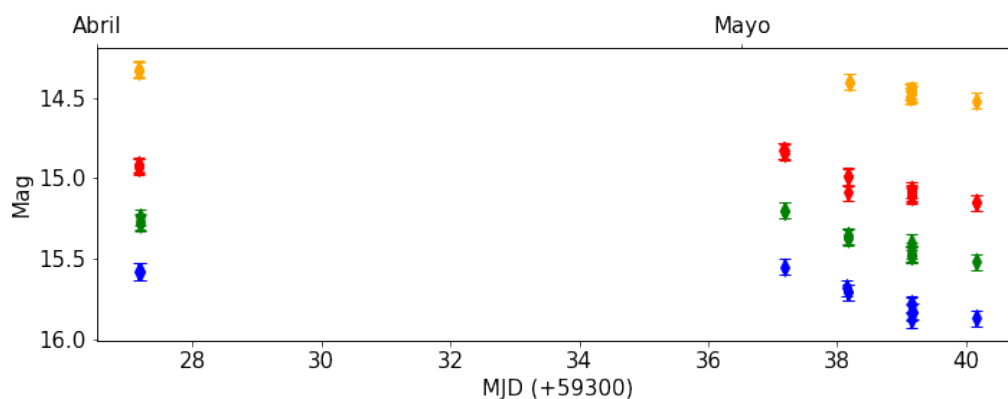


Figura 4.1: Curva de luz de OJ 287 con las observaciones durante los dos meses de observación.

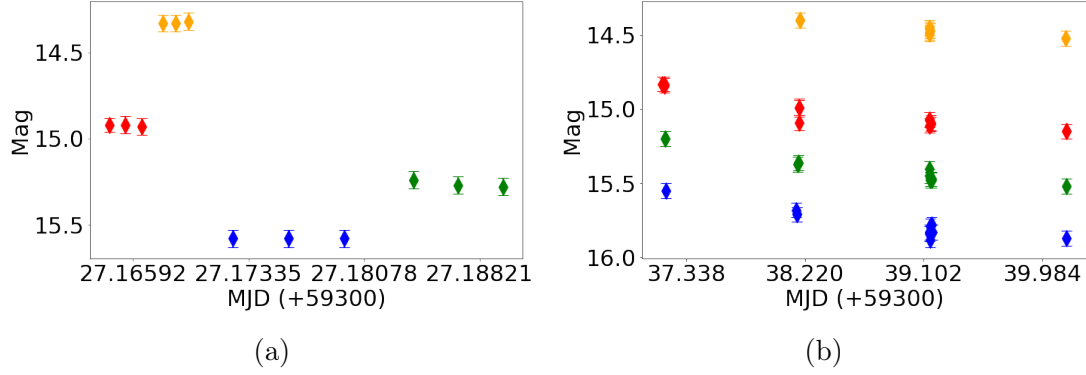


Figura 4.2: Curvas de luz de OJ 287. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021. Para abril solo se tiene observaciones de una noche.

Tabla 4.1: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de OJ 287 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} (5)	$t_{d,min}$ [días] (6)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59327 59337 - 59341	False True	0.32	0.003	0.00208
V	59327 59337 - 59341	False True	0.31	0.00512	0.00355
R	59327 59337 - 59341	False True	0.31	0.00011	8e-05
I	59327 59338 - 59341	False False			

NOTAS: En la columna (2) se muestra la época de observación; la columna (3) enlista los valores lógicos que resultan de aplicar el código descrito en el Código 3.4, y su interpretación está dada en la sección correspondiente; la columna (4) es la amplitud de variabilidad dada por la ecuación (3.6); la columna (5) es el mínimo valor encontrado para la escala de variabilidad usando la ecuación (3.7), que nos permite determinar el tamaño máximo de la región de emisión; la columna (6) es el mínimo en las escalas de variabilidad usando la ecuación de duplicación de flujo (3.8).

S4 0954+65

Como ocurrió con OJ 287, tenemos que para abril las observaciones de S4 0954+65 se tienen solo para una noche que corresponde al 23 de abril por lo que en este caso no se buscó STV, las curvas de luz para esta noche se muestran en la Figura 4.4a. Por otro lado, para mayo se cuenta con las observaciones de 3 noches consecutivas que van del 3 al 5 de mayo, salvo para el filtro I. En esta segunda época se observa una posible variación en las curvas de luz (ver Figura 4.3).

Para las noches de mayo (ver Figura 4.4b), del análisis de variabilidad se encuentra la presencia de esta en los filtros B y R, mientras que para los filtros V e I no se

detectó. Para el caso del filtro I este resultado no da mucha información dado que solo se tienen dos noches de observaciones para determinar variabilidad. En el caso del filtro V notamos que en la noche del 3 de mayo se tienen dos observaciones con un cambio de más de 0.1 magnitudes, esto pudo afectar al análisis estadístico que se realizó para determinar la presencia de variabilidad.

Con lo anterior, dado que solo se determinó variabilidad en dos de los cuatro filtros, se concluiría la ausencia de variabilidad en la fuente para este periodo de observación.

La mínima escala de variación en el filtro R, que correspondería a la obtenida para el cambio en la magnitud durante la noche del 4 de mayo de 0.15 magnitudes, es de 0.03029 días.

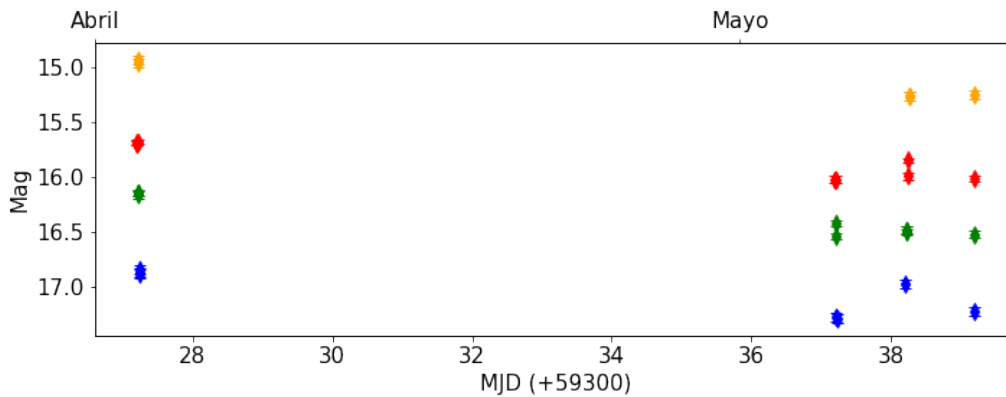


Figura 4.3: Curva de luz de S4 0954+65 con las observaciones durante los dos meses de observación.

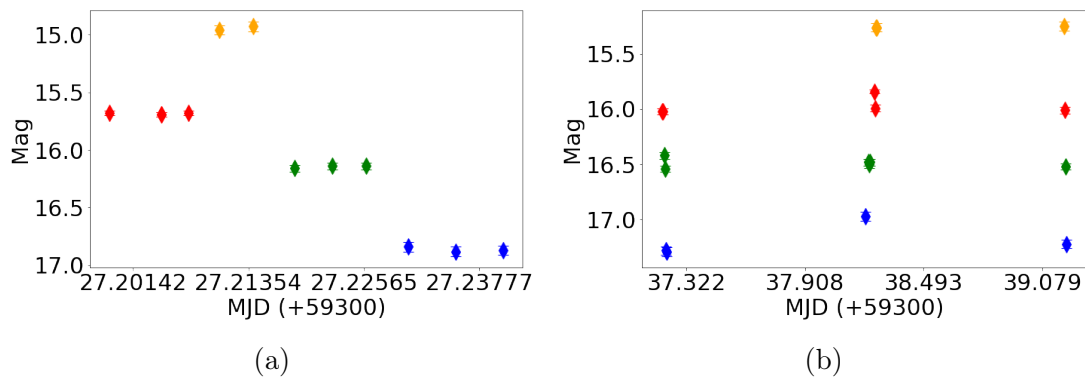


Figura 4.4: Curvas de luz de S4 0954+650. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021. Para abril solo se tiene observaciones de una noche.

ON 231

Para ON 231 tenemos un comportamiento muy interesante con los datos recabados durante las 14 noches de observación disponibles. Se puede notar de las curvas de luz

Tabla 4.2: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de S4 0954+65 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} (5)	$t_{d,min}$ [días] (6)
(1)	(2)	(3)	(4)		
B	59327	False	0.31	0.23482	0.16276
	59337 - 59340	True			
V	59327	False			
	59337 - 59340	False			
R	59327	False	0.18	0.03029	0.02099
	59337 - 59340	True			
I	59327	False			
	59338 - 59340	False			

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

(Figura 4.5) que durante todo el periodo de observación la fuente presenta variaciones de magnitud en los cuatro filtros.

Si vemos el caso de las observaciones de abril, correspondientes a las noches del 22 al 24 de abril, notamos que la variación no es evidente de las curvas de luz (ver Figura 4.6a), pero al hacer el análisis de variabilidad se encuentra variabilidad en los filtros B e I, con amplitudes de 0.22 y 0.35 magnitudes respectivamente (ver Tabla 4.3).

En las 6 noches de mayo para las que se tienen observaciones se ve una variación más clara en las curvas de luz de los 4 filtros, aunque para los filtros I y R no se tienen los datos de las 6 noches (ver Figura 4.6b). Estas variaciones se ven reflejadas al hacer el análisis de variabilidad de la fuente pues se encuentra que en los cuatro filtros hay presencia de variabilidad (ver Tabla 4.3). Así que para este periodo se concluye que sí existe la presencia de STV en la fuente. En las escalas mínimas de variabilidad se observan valores muy diferentes para cada filtro. Podemos notar este comportamiento en particular al comparar las escalas mínimas para los filtros B y V, pues a pesar de que se tiene la misma cantidad de puntos para ambos filtros y las curvas de luz parecen seguir tendencias muy parecidas, hay un orden de magnitud de diferencia entre las escalas mínimas de variabilidad.

Para las 5 noches de junio ocurre algo similar al caso de mayo, de nuevo tenemos una variabilidad más evidente en las curvas de luz de los cuatro filtros (ver Figura 4.6c). Esto se ve reflejado en los resultados de la Tabla 4.3, donde se muestra que se detecta variabilidad en los cuatro filtros, con una amplitud entre 0.23 y 0.29 magnitudes por lo que también hay presencia de STV en este periodo.

Observamos un contraste interesante en las escalas mínimas de variabilidad, por un lado, para el filtro B encontramos que la escala mínima es de 6.0392 días, mientras que en el caso del filtro I la escala es al menos dos órdenes de magnitud menor, esto puede estar asociado con que las observaciones para cada filtro no tienen la misma distribución en el tiempo.

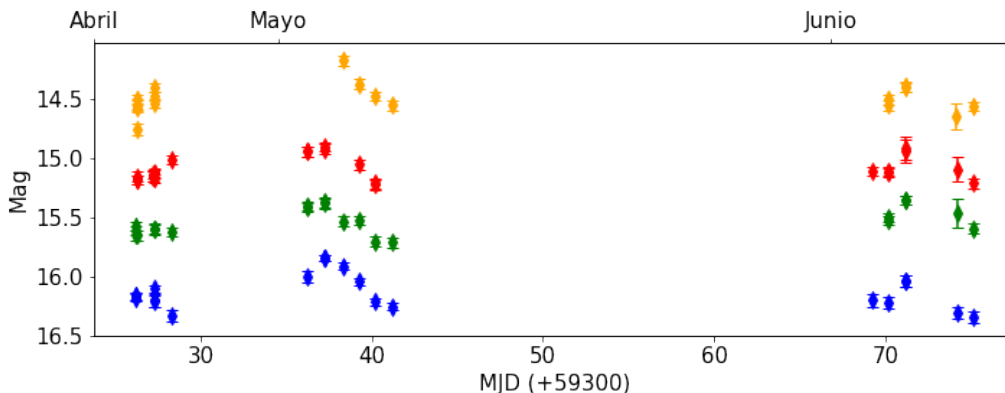


Figura 4.5: Curva de luz de ON 231 con las observaciones durante los tres meses de observación.

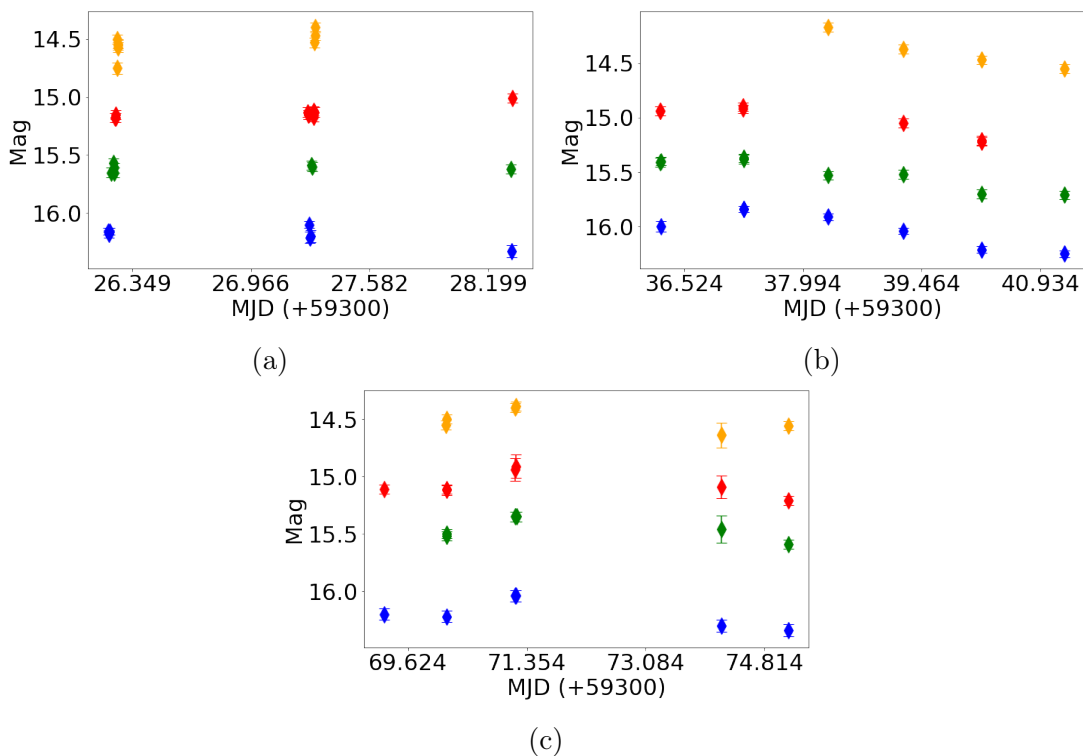


Figura 4.6: Curvas de luz de ON 231. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.

3C 273

En las curvas de luz de 3C 273 (Figura 4.7) se puede observar un comportamiento prácticamente estable durante todo el periodo de observación.

Esto se confirma al hacer el análisis de variabilidad para cada una de las épocas, con los resultados mostrados en la Tabla 4.4 concluimos que para ninguna de las tres épocas de observación se detectó variabilidad que se pudiera asegurar estuviera

Tabla 4.3: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de ON 231 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} [días]	$t_{d,min}$ [días]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59326-59329	True	0.22	0.03674	0.02547
	59336-59342	True	0.41	6.44837	4.46967
	59369-59376	True	0.29	6.0392	4.18606
V	59326-59329	False			
	59336-59342	True	0.34	0.1498	0.10383
	59370-59376	True	0.23	0.06385	0.04426
R	59326-59329	False			
	59336-59341	True	0.31	0.10543	0.07308
	59369-59376	True	0.29	0.12784	0.08861
I	59326-59328	True	0.35	9e-05	6e-05
	59338-59342	True	0.38	5.06237	3.50897
	59370-59376	True	0.24	0.03246	0.0225

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

asociada a la fuente.

Es un resultado inusual para 3C 273, pues en general se ha reportado como una fuente variable en todas las longitudes de onda, como se mencionó en el capítulo 2. Para tener una mejor idea de porque se presentan estos resultados sería útil analizar el estado de actividad de 3C 273 en longitudes de onda cercanas al óptico en este mismo periodo.

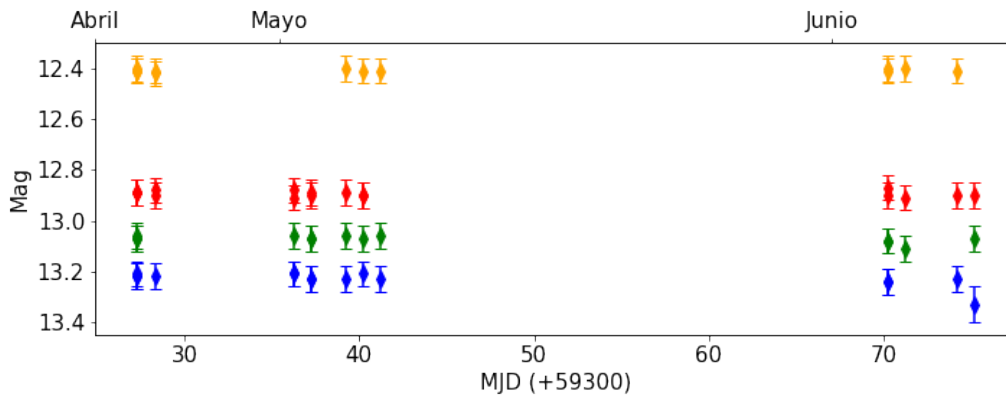


Figura 4.7: Curva de luz de 3C 273 con las observaciones durante los tres meses de observación.

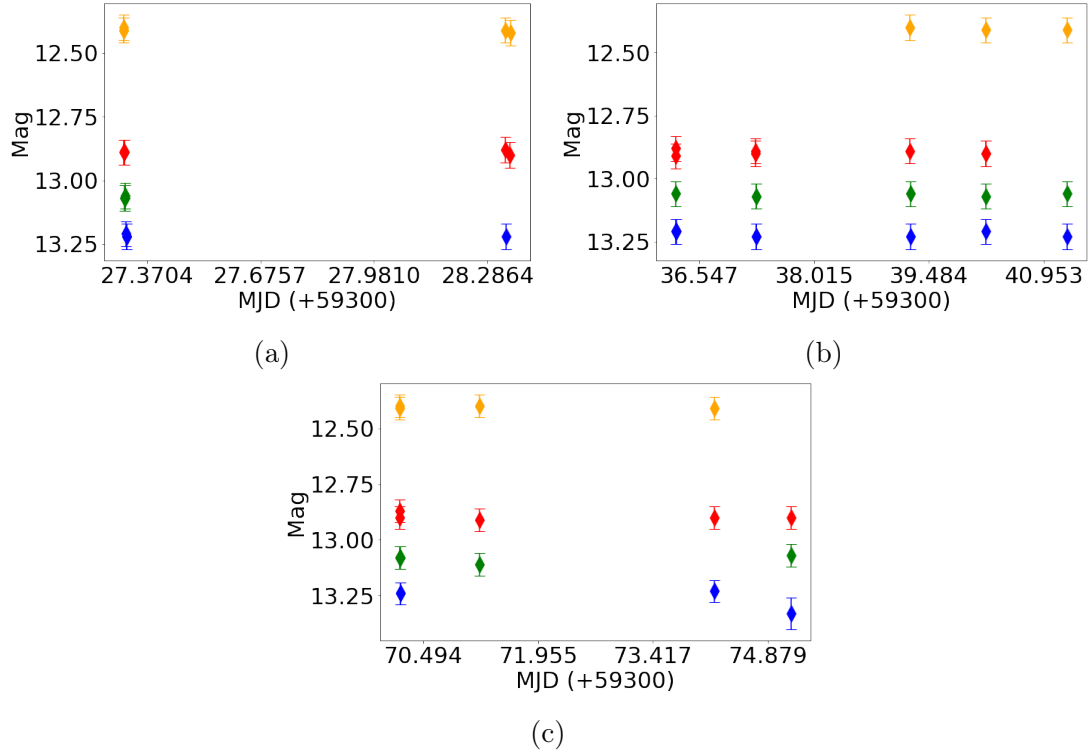


Figura 4.8: Curvas de luz de 3C 273. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.

Tabla 4.4: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de 3C 273 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} (5)	$t_{d,min}$ [días]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59327 - 59329	False			
	59336 - 59342	False			
	59370 - 59376	False			
V	59327	False			
	59336 - 59342	False			
	59370 - 59376	False			
R	59327 - 59329	False			
	59336 - 59341	False			
	59370 - 59376	False			
I	59327 - 59329	False			
	59339 - 59342	False			
	59370 - 59375	False			

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

3C 279

Para 3C 279 notamos en las curvas de luz (Figura 4.9) que para la noche del 23 de abril se tienen observaciones solo en el filtro R, mientras que para las noches de mayo y junio se cuenta con observaciones en los 4 filtros. De esta manera, para la noche del 23 de abril no hacemos estudio de variabilidad pues buscamos STV en los cuatro filtros.

Al considerar las observaciones realizadas en mayo (Figura 4.10b) encontramos que se observa un primer crecimiento y luego un decrecimiento en el brillo en los filtros B, V y R, para el filtro I solo se tiene la disminución en el brillo pues para las noches en las que estaría el posible aumento de brillo no se tienen observaciones. Al hacer el análisis de variabilidad se encuentra que precisamente en el filtro I se concluye que no hay variabilidad, mientras que para los filtros B, V y R sí hay, con una amplitud de 0.24, 0.23 y 0.09 magnitudes, respectivamente. Con lo que concluimos la presencia de STV en la fuente.

Finalmente, en las 4 noches de junio para las que se tienen observaciones se ve variabilidad en los 4 filtros: se observa una disminución en el brillo de la fuente (ver Figura 4.10c). Sin embargo, hay que notar que para la noche 6 de junio en los filtros B e I se observan variaciones considerables en la misma noche, algo similar ocurre en la noche del 9 de junio con el filtro I.

Para esta época se concluyó la presencia de STV, pues se detectó variabilidad en los cuatro filtros (ver Figura 4.10c) con amplitudes desde 0.37 hasta 0.58 (ver Tabla 4.5).

Las escalas de variabilidad son del mismo orden de magnitud para los filtros B, V y R, entonces podríamos decir que la región de emisión que origina estas variaciones es la misma. Para el filtro I ocurre que la escala de variabilidad mínima es un orden de magnitud menor que en los otros tres filtros, esto está probablemente relacionado con las grandes variaciones detectadas para una misma noche en este filtro.

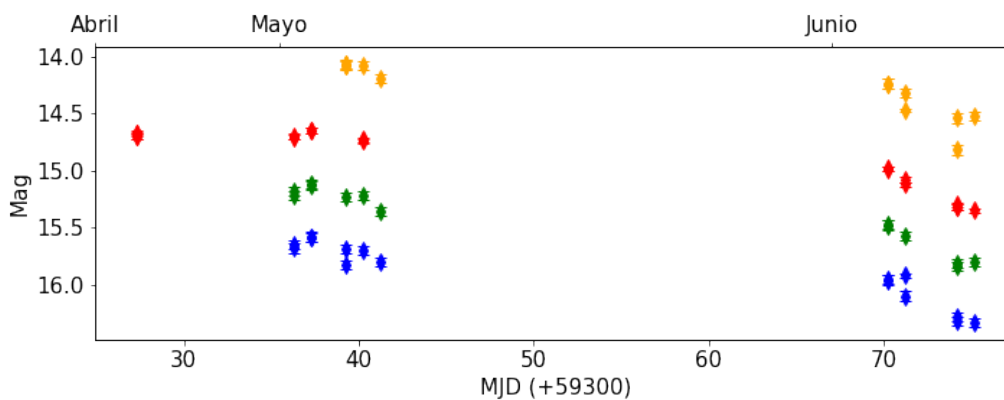


Figura 4.9: Curva de luz de 3C 279 con las observaciones durante los tres meses de observación.

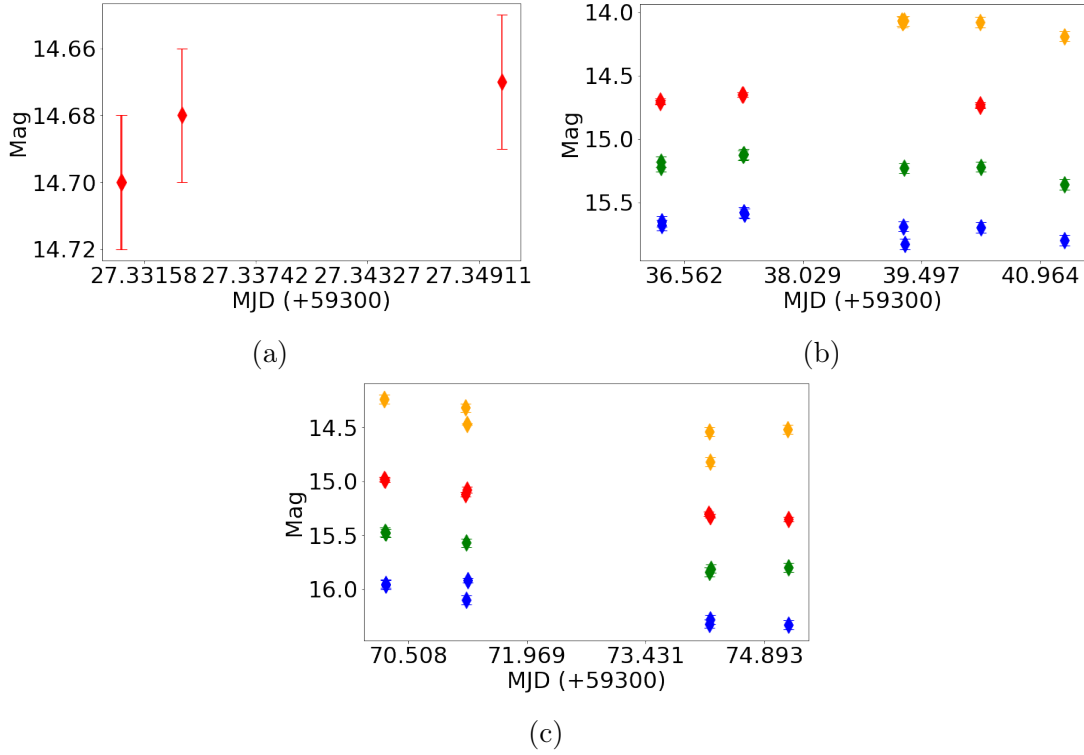


Figura 4.10: Curvas de luz de 3C 279. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.

Tabla 4.5: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de 3C 279 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} (5)	$t_{d,min}$ [días]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59336-59342	True	0.24	0.09599	0.06654
	59370-59376	True	0.41	0.13485	0.09347
V	59336-59342	True	0.23	0.12865	0.08917
	59370-59376	True	0.37	0.42456	0.29428
R	59327	False			
	59336-59341	True	0.09	0.3638	0.25217
I	59370-59376	True	0.37	0.32039	0.22208
	59339 - 59342	False			
	59370-59376	True	0.58	0.0294	0.02038

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

PKS 1510-089

En las curvas de luz de PKS 1510-089 (Figura 4.11) se observa una variación considerable en el brillo de mayo a junio, pues en este último mes hay una diferencia

de más de 0.5 magnitudes en todos los filtros, siendo la fuente más brillante en todos los filtros durante las observaciones de junio. Además hay variaciones al considerar las curvas de luz separadas en las observaciones correspondientes a cada mes.

Durante las 5 noches de mayo, para los cuatro filtros se ve una disminución del brillo en las primeras cuatro noches, y para el filtro I un pequeño aumento (ver Figura 4.12a). Esto se ve reflejado en el análisis de variabilidad, pues se encontró que la fuente presentaba variabilidad en los cuatro filtros con amplitudes entre 0.15 y 0.32 magnitudes (ver Tabla 4.2), con lo que se concluye la presencia de STV.

En el filtro I, la amplitud y escala mínima de variabilidad resultan extrañas respecto a los valores encontrados para el resto de los filtros, esto puede estar asociado a la cantidad de puntos que se tienen para estimar los parámetros, pues para el filtro I se tienen datos solo de 3 noches, mientras que para el resto de filtros se tienen observaciones de 4 o 5 noches.

Para el mes de junio se observó, además del aumento respecto al brillo en mayo, el aumento del brillo durante las 4 noches de observación en los cuatro filtros, en particular un aumento más marcado en las noches del 9 y 10 de junio (ver Figura 4.12b). Las amplitudes de variabilidad indican que la fuente tuvo variaciones más importantes en los filtros R e I, mientras que para el filtro B no se detectó la presencia de variaciones (Tabla 4.6). A pesar de esto último, se puede concluir la presencia de STV.

En este caso también se tienen resultados inconsistentes entre los filtros para la escala mínima de variabilidad. De nuevo, esto podría ser por la diferencia en el número de observaciones.

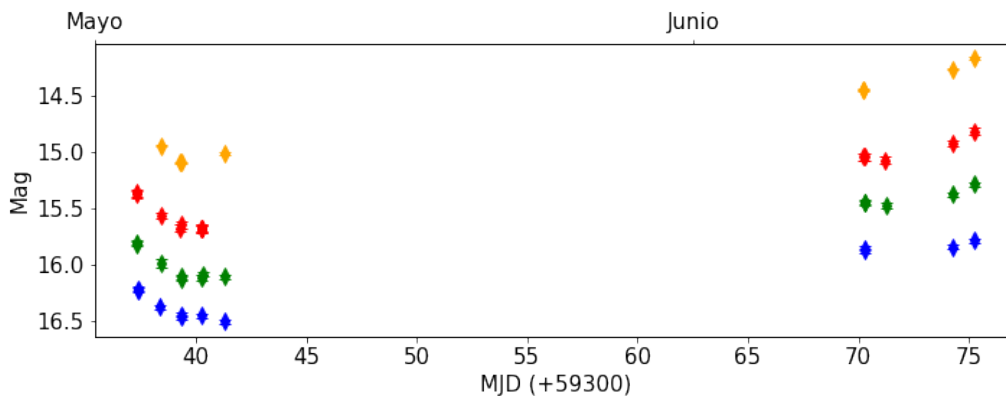


Figura 4.11: Curva de luz de PKS 1510-089 con las observaciones durante los dos meses de observación.

DA 406

Para DA 406 tenemos pocas observaciones en toda la campaña de observación (ver Figura 4.13). Al considerar las observaciones por mes, solo tenemos observaciones para una noche en mayo, con lo que no podemos hacer estudios de STV (ver Figura 4.14a).

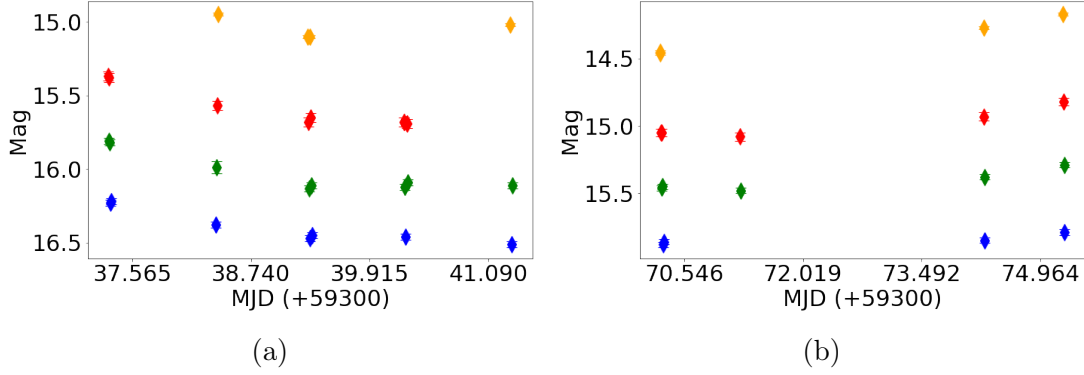


Figura 4.12: Curvas de luz de PKS 1510-089. Datos obtenidos en (a) mayo 2021, (b) junio 2021.

Tabla 4.6: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de PKS 1510-089 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} [días]	$t_{d,min}$ [días]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59337-59342	True	0.29	0.85707	0.59407
	59370 - 59376	False			
V	59337-59342	True	0.32	1.11476	0.77269
	59370-59376	True	0.19	1.0184	0.7059
R	59337-59341	True	0.32	0.64584	0.44766
	59370-59376	True	0.26	9.88744	6.85345
I	59338-59342	True	0.15	6.3581	4.4071
	59370-59376	True	0.29	0.69056	0.47866

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

En el caso de las observaciones de junio (Figura 4.14b) tenemos que el filtro para el que se tienen observaciones de más noches es el filtro R, con datos de tres noches, a pesar de esto, para el filtro V se detectó la presencia de variabilidad y bastan dos puntos en la curva de luz para concluir esto (ver Tabla 4.7). Sin embargo, esto no es suficiente para poder concluir la presencia de variabilidad en la fuente.

Markarian 501

En las curvas de luz (Figura 4.15) se puede observar que la magnitud parece mantenerse constante en los diferentes periodos de observación para los cuatro filtros, salvo en el filtro I en mayo.

Al analizar la variabilidad por mes se encontró que precisamente para el filtro I en mayo es la única época en la que se podría determinar variabilidad en la fuente. Dado que en el resto de los filtros el brillo parece mantenerse estable se concluye que

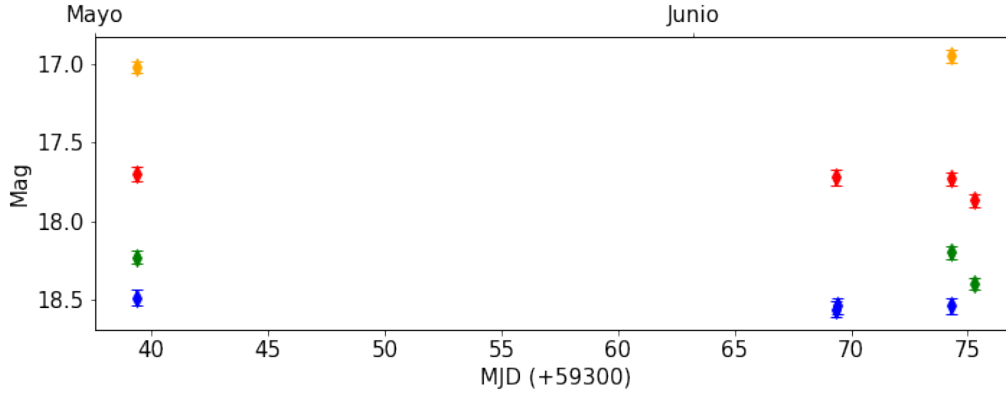


Figura 4.13: Curva de luz de DA 406 con las observaciones durante los dos meses de observación.

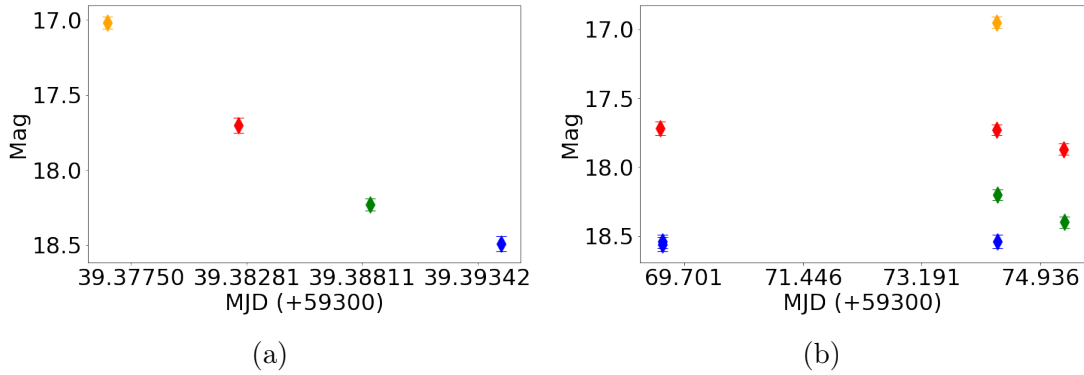


Figura 4.14: Curvas de luz de DA 406. Datos obtenidos en (a) mayo 2021, (b) junio 2021.

Tabla 4.7: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de DA 406 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} [días]	$t_{d,min}$ [días]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59369 - 59375	False			
V	59374-59376	True	0.19	6.06889	4.20664
R	59369 - 59376	False			

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

no existe STV para ninguno de los periodos de observación. Sin embargo, para hacer un análisis correcto de la emisión del núcleo de Markarian 501 es necesario considerar la corrección por la galaxia huésped, pues su contribución al brillo total de la fuente es considerable, como se mencionó en el capítulo 2.

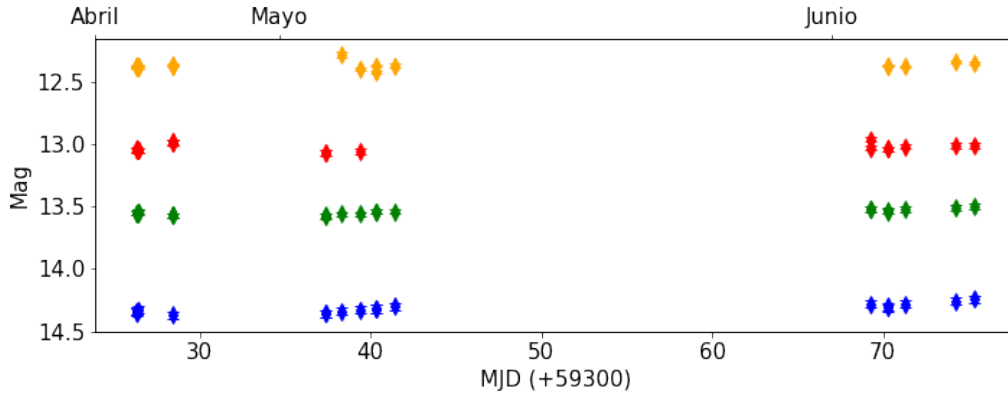


Figura 4.15: Curva de luz de Markarian 501 con las observaciones durante los tres meses de observación.

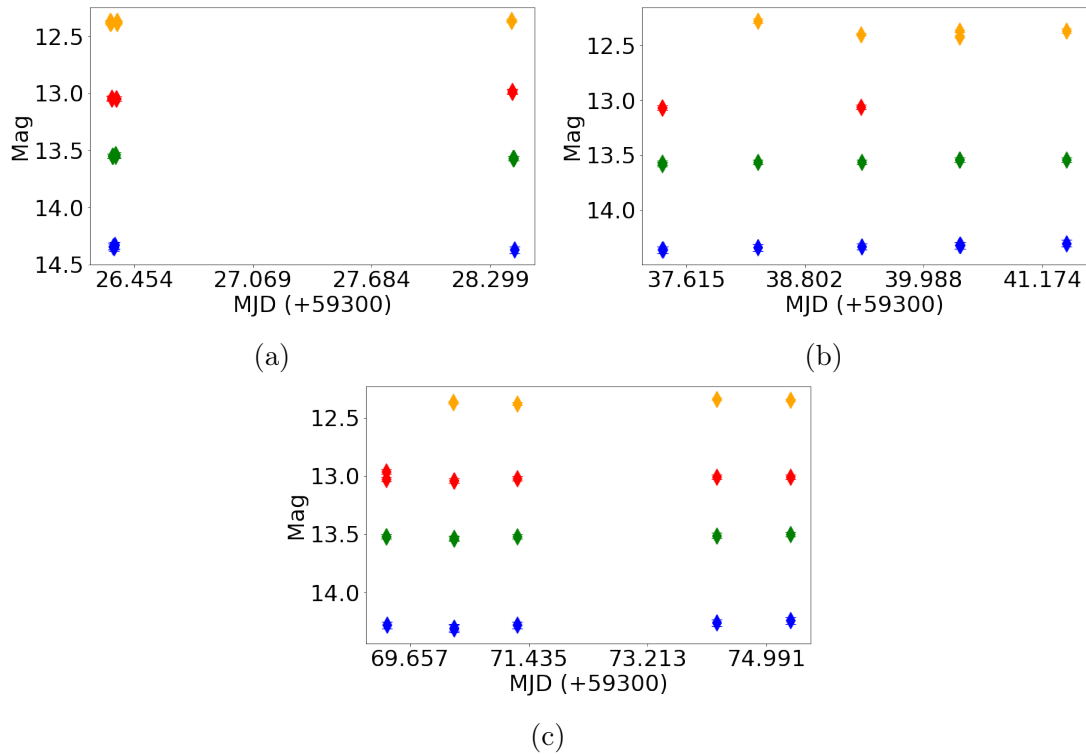


Figura 4.16: Curvas de luz de Markarian 501. Datos obtenidos en (a) abril 2021, (b) mayo 2021, (c) junio 2021.

BL Lacerta

Para BL Lacerta solo se realizaron observaciones en 3 noches de junio, y en particular para el filtro I solo se obtuvo una observación para la noche del 10 de junio (ver figura 4.17). Sin embargo, para los otros tres filtros se obtuvieron observaciones de las 3 noches, en las que la magnitud de la fuente varió considerablemente, lo que podemos ver de los resultados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.8: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de Markarian 501 en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} [días]	$t_{d,min}$ [días]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59326 - 59329	False			
	59337 - 59342	False			
	59369 - 59376	False			
V	59326 - 59329	False			
	59337 - 59342	False			
	59369 - 59376	False			
R	59326 - 59329	False			
	59337 - 59340	False			
	59369 - 59376	False			
I	59326 - 59329	False			
	59338 - 59342	True	0.14	0.07646	0.053
	59370 - 59376	False			

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

Se encuentran amplitudes de variabilidad grandes respecto al resto de la muestra, con una amplitud de variabilidad máxima en el filtro V de 1.03 magnitudes. Sin embargo, dada la cantidad de puntos, este resultado debe tomarse con cautela. Para complementar estos resultados sería útil completar las curvas de luz con más observaciones de este periodo y considerar el estado de actividad de BL Lacerta en otras longitudes de onda.

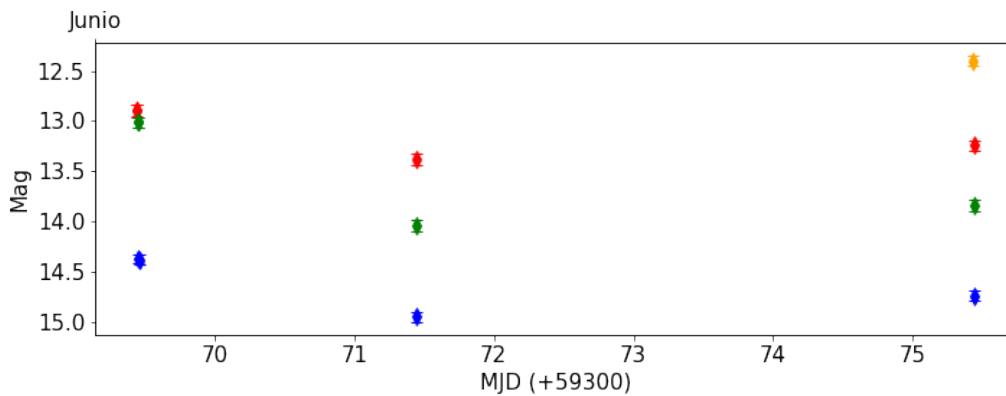


Figura 4.17: Curva de luz de BL Lacerta. Datos obtenidos en junio 2021

Tabla 4.9: Resultados del análisis de variabilidad de flujo de BL Lacerta en los diferentes filtros.

Filtro	Época [MJD]	Prueba χ^2	A [mag]	τ_{min} [días]	$t_{d,min}$ [días]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
B	59369 - 59376	True	0.58	0.24343	0.16873
V	59369 - 59376	True	1.03	2.09726	1.45371
R	59369 - 59376	True	0.48	0.30344	0.21033

NOTAS: En la Tabla 4.1 se encuentra la descripción detallada de las columnas de la tabla.

4.2. Variabilidad de color y cambios espectrales

Un primer vistazo a las propiedades espectrales de los objetos en la muestra de blázares, a lo largo de los periodos de observación, es a través de sus SED. En la Figura 4.18 se presenta un ejemplo para 3C 279, así como en el capítulo anterior, en la Figura 3.2, se presentó la SED de ON 231. El resto de distribuciones se pueden encontrar en el Apéndice 6.1.

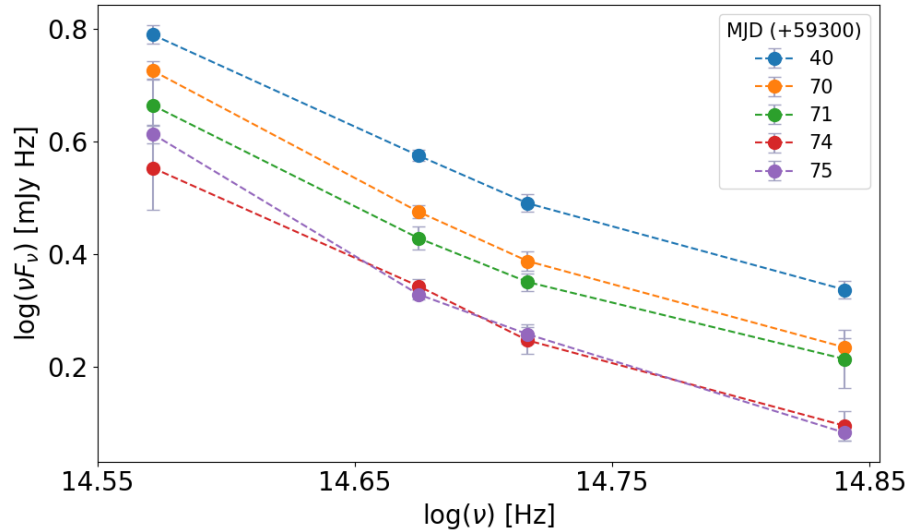


Figura 4.18: Distribución espectral de energía de 3C 279 para diferentes épocas de observación.

En las distribuciones se puede observar un claro comportamiento variable a lo largo de las diferentes épocas de observación, es decir, la SED varía respecto al flujo emitido en cada época. Es difícil reconocer variabilidad en las pendientes, que corresponden a los índices espectrales entre cada observación, para observar esta variabilidad se utilizan las gráficas de índice espectral contra el tiempo.

Para hacer el análisis de variabilidad de color se consideraron los índices de color B-V, V-R, R-I y B-I. Hay que notar que para todos los índices entre mayor sea el

valor del índice la fuente es más roja.

Para hacer la determinación de comportamientos de las fuentes con base en el análisis de correlación se consideró que una fuente presenta un comportamiento BWB si se tiene $r > 0.2$ y $P < 0.01$, mientras que se consideró que una fuente presentaba un comportamiento RWB si $r < -0.2$ y $P < 0.01$, podemos entender esto como que se busca una correlación no tan fuerte, ya sea positiva o negativa, pero se es muy estricto respecto a la posibilidad de que la correlación que se encuentra no sea estadísticamente relevante, pues se pide que la probabilidad de que no exista correlación sea menor al 1 %.

B-V

Para este índice de color tenemos que solo para dos fuentes se cumplen los criterios para determinar algún comportamiento: PKS 1510-089 tiene una tendencia RWB y Markarian 501 presenta una tendencia BWB (Tabla 4.10).

Para el caso de PKS 1510-089, el resultado encontrado es consistente con lo reportado en estudios previos de la fuente, así como con el comportamiento que en general se ha descrito para blázares del tipo FSRQ.

Por otro lado, para Markarian 501 este resultado contribuye a lo encontrado por Otero-Santos et al. (2022), y choca con lo reportado por Negi et al. (2022). Es interesante que el índice de color varía considerablemente aún cuando el brillo no varía tanto, como se vio en la sección anterior.

Para DA 406, que solo se tienen dos puntos para el diagrama (ver Figura 4.19), no se puede concluir ninguna relación con certeza pues aunque la tendencia indicaría un comportamiento RWB el p -value resulta 1, es decir, la probabilidad de que los datos no tengan correlación es 1.

En el caso de BL Lacerta ocurre algo similar pues se tiene una tendencia que indicaría un comportamiento RWB, sin embargo, por tener solo tres observaciones en el diagrama color-magnitud hay una probabilidad mayor a 10 % de que los datos no tengan correlación, aunque el coeficiente de correlación sea -0.98 como se muestra en la Tabla 4.10.

Para el resto de las fuentes se nota en los diagramas que la dispersión de las observaciones no indican correlaciones considerables, en particular se hace más notorio en los casos de ON 231 y 3C 273. Esto se ve reflejado en los resultados que se muestran en la Tabla 4.10.

Para los diagramas índice espectral-magnitud (ver Figura 4.20), los comportamientos y correlaciones son equivalentes a lo que se mostró en los diagramas color-magnitud, esto se debe a que para obtener el índice espectral se usó la ecuación (3.14), en la que el índice espectral depende linealmente del índice de color.

Con lo anterior, se encontró que solo dos fuentes presentan un comportamiento respecto al índice espectral. Por un lado PKS 1510-089 presenta un comportamiento SWB, y por otro, Markarian 501 presenta un comportamiento FWB. Para el resto de fuentes no se puede concluir que sigan uno u otro comportamiento con los criterios establecidos (ver Tabla 4.11).

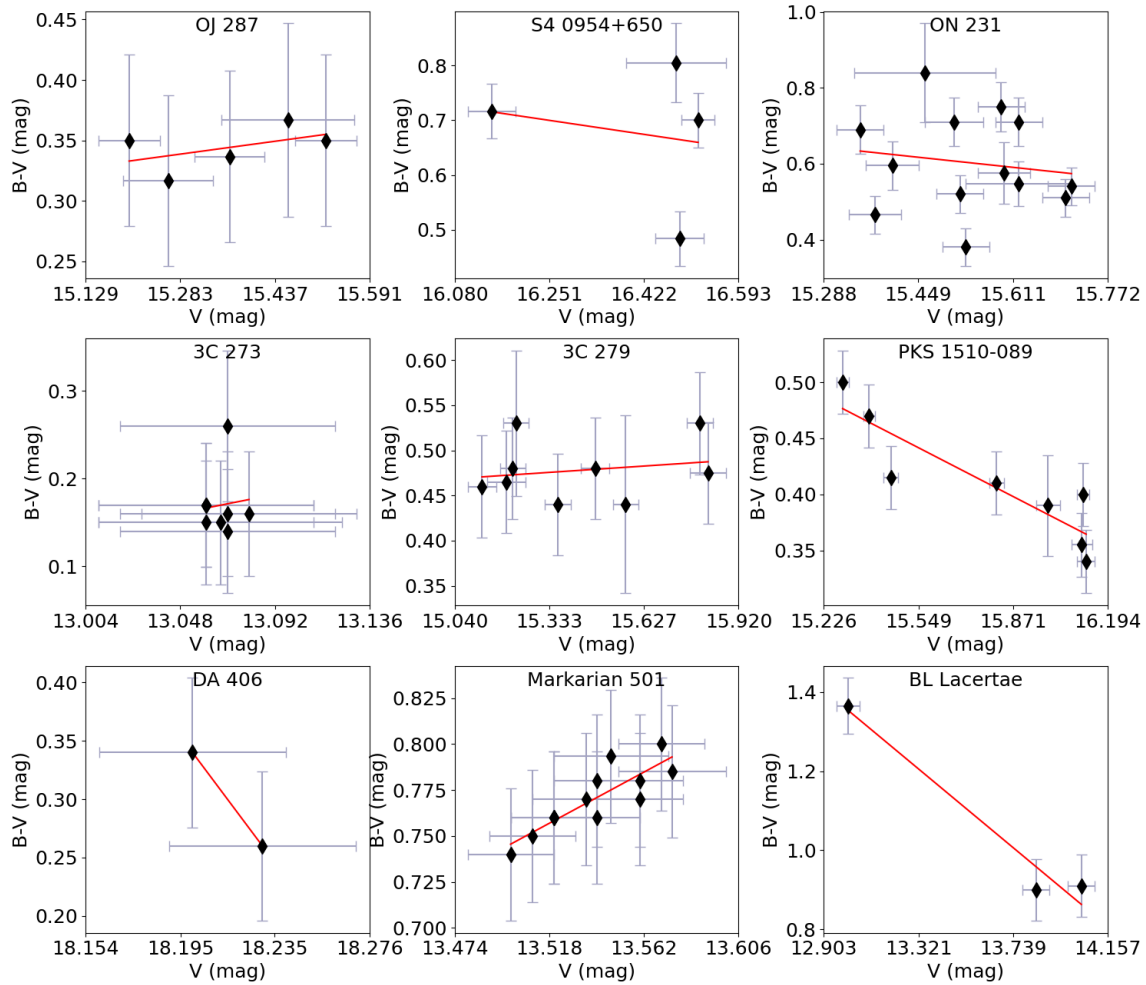


Figura 4.19: Diagramas color-magnitud para el índice de color $B-V$ para todas las fuentes de la muestra.

Al analizar cómo varía el índice espectral a lo largo de los periodos de observación de cada fuente, en los diagramas de la Figura 4.21 se observan variaciones para todas las fuentes, sin embargo, solo para tres de estas las variaciones son significativas respecto a los errores de las observaciones y su tendencia general. Las fuentes en cuestión son ON 231, PKS 1510-089 y BL Lacertae que muestran amplitudes de variabilidad de 0.64, 0.22 y 0.64 respectivamente (Tabla 4.12).

Para ON 231 y PKS 1510-089 se observa una tendencia primero decreciente que cambia al pasar de mayo a junio, pues se ve un aumento del índice espectral para las últimas noches de observación, es decir, el espectro se inclina más (ver Figura 4.21). Mientras que en BL Lacertae el índice de la primer noche es el que indica un espectro más inclinado, que posteriormente se aplana en las dos noches siguientes.

Para el resto de fuentes, aunque no pasan una prueba χ^2 , se observan variaciones en los diagramas de la Figura 4.21, estas son de amplitud más pequeña pues las observaciones quedan dentro de las barras de error de otras observaciones. A pesar de esto, el comportamiento en Markarian 501 es interesante pues se ve una tendencia

Tabla 4.10: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas color-magnitud de la Figura 4.19, con el índice de color B-V.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	$\langle\alpha\rangle(\sigma)$ (7)	Comportamiento (8)
OJ 287	13	0.07 (0.41)	0.49 (0.23)	0.4	5	0.49 (0.11)	None
S4 0954+650	12	-0.15 (0.3)	-0.19 (0.33)	0.81	4	0.95 (0.27)	None
ON 231	49	-0.16 (0.3)	-0.15 (0.18)	0.63	13	0.85 (0.34)	None
3C 273	48	0.49 (3.06)	0.09 (0.24)	0.83	8	0.24 (0.13)	None
3C 279	48	0.02 (0.08)	0.19 (0.22)	0.63	9	0.67 (0.14)	None
PKS 1510-089	38	-0.13 (0.04)	-0.89 (0.05)	2.9E-03	8	0.58 (0.13)	RWB
DA 406	36	-2.67 (0)	-1.0 (0.0)	1.0	2	0.42 (0.09)	None
Markarian 501	49	0.63 (0.34)	0.85 (0.05)	4.2E-04	12	1.09 (0.05)	BWB
BL Lacerta	6	-0.48 (0.08)	-0.98 (0.02)	0.13	3	1.49 (0.43)	None

NOTAS: En la columna (2) se muestra el intervalo del tiempo en el que se hicieron las observaciones; la columna (3) presenta la pendiente del ajuste a los puntos del diagrama, junto con su incertidumbre; la columna (4) muestra el valor del coeficiente de correlación de Pearson junto con su incertidumbre; en la columna (5) encontramos el p -value asociado a la prueba de correlación de Pearson; la columna (6) muestra la cantidad de puntos, que equivale a la cantidad de observaciones cuasi-simultáneas, en los diagramas; el índice espectral promedio y su error se encuentran en la columna (7); y en la columna (8) se encuentra el comportamiento que se deduce del análisis de correlación.

Tabla 4.11: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas índice espectral-magnitud de la Figura 4.20, considerando el índice espectral para el color B-V.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	Comportamiento (7)
OJ 287	12	0.1 (0.41)	0.49 (0.23)	0.4	5	None
S4 0954+650	11	-0.21 (0.3)	-0.19 (0.33)	0.81	4	None
ON 231	48	-0.23 (0.3)	-0.15 (0.18)	0.63	13	None
3C 273	47	0.69 (3.06)	0.09 (0.24)	0.83	8	None
3C 279	47	0.03 (0.08)	0.19 (0.22)	0.63	9	None
PKS 1510-089	37	-0.19 (0.04)	-0.89 (0.05)	2.9E-03	8	SWB
DA 406	35	-3.76 (0)	-1.0 (0.0)	1.0	2	None
Markarian 501	49	0.89 (0.34)	0.85 (0.05)	4.2E-04	12	FWB
BL Lacerta	5	-0.67 (0.08)	-0.98 (0.02)	0.13	3	None

NOTAS: En la columna (2) se muestra el intervalo del tiempo en el que se hicieron las observaciones; la columna (3) presenta la pendiente del ajuste a los puntos del diagrama, junto con su incertidumbre; la columna (4) muestra el valor del coeficiente de correlación de Pearson junto con su incertidumbre; en la columna (5) encontramos el p -value asociado a la prueba de correlación de Pearson; la columna (6) muestra la cantidad de puntos, que equivale a la cantidad de observaciones cuasi-simultáneas, en los diagramas; y en la columna (7) se encuentra el comportamiento que se deduce del análisis de correlación.

decreciente en el índice espectral durante prácticamente todo el periodo de observación, esto implicaría que su espectro tuvo una tendencia a aplanarse durante las observaciones realizadas.

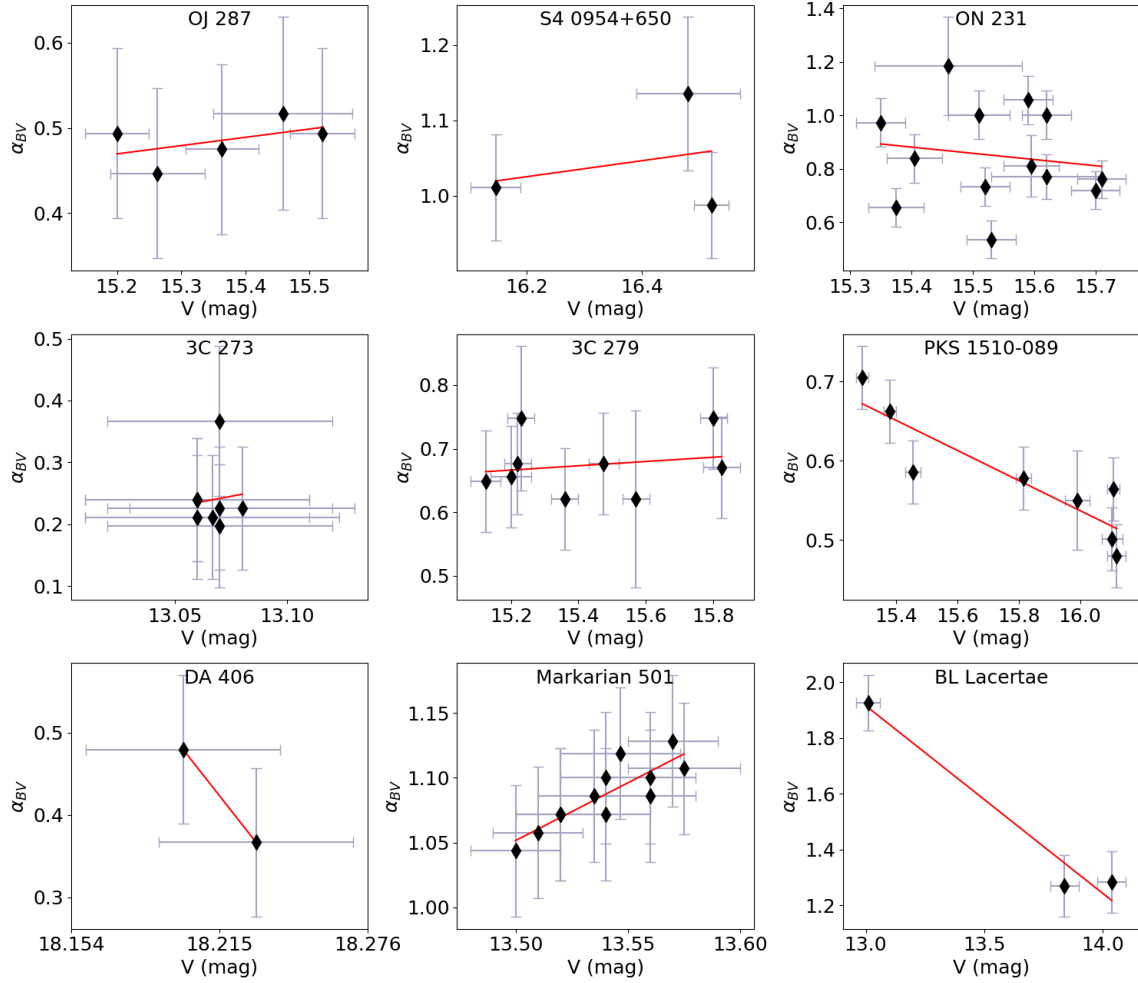


Figura 4.20: Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color B-V para todas las fuentes de la muestra.

V-R

En el caso del índice V-R se encontró que ninguna de las fuentes cumple con los criterios para determinar un comportamiento RWB o BWB, como se observa en la Tabla 4.13. Sin embargo, la variación del índice de color con el estado de actividad de la fuente es clara para todos los blázares de la muestra. Dos casos particulares que son interesantes son el de Markarian 501 y el de BL Lacerta.

Para el primero vemos en la Figura 4.22 que los dos puntos correspondientes a los estados de mayor brillo están asociados con un color mayor, lo que podría indicar un comportamiento RWB, que se confirma con la información en la Tabla 4.13, pero la presencia de un leve crecimiento del índice de color en los estados de menor brillo lleva a que la probabilidad de que no haya correlación supere el 10%.

Por otro lado, con BL Lacerta se tiene un coeficiente que indicaría una fuerte correlación positiva entre el color y la magnitud, que se traduciría en un comportamiento BWB, sin embargo, al solo tener tres puntos en el diagrama, la probabilidad

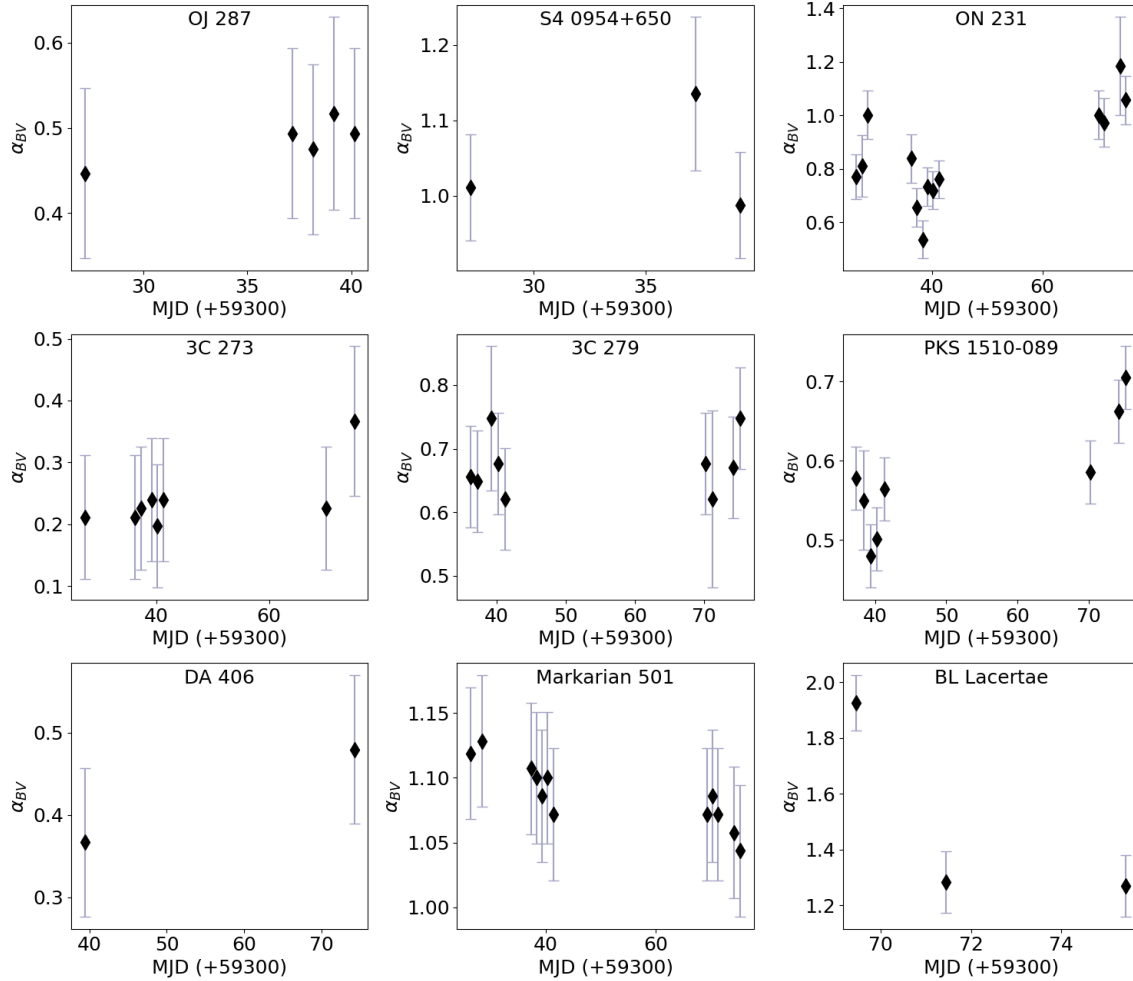


Figura 4.21: Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color B-V para todas las fuentes de la muestra.

de que en realidad no exista tal correlación supera el 10%, como se muestra en la Tabla 4.13. Mientras con el color B-V se encontraba una fuerte correlación negativa, señal de un posible comportamiento RWB.

En el resto de fuentes, las observaciones no concluyen la presencia de ningún comportamiento.

De nuevo tenemos que los resultados obtenidos al analizar los diagramas índice espectral-magnitud son equivalentes a lo que se obtuvo de los diagramas color-magnitud. En la Figura 4.23 se muestran estos diagramas y en la Tabla 4.13 los resultados del análisis de correlación, donde no hay ninguna fuente a la que se le pueda asociar un comportamiento considerando los criterios establecidos.

En la Figura 4.24 observamos que en todas las fuentes se distinguen variaciones en el índice espectral, sin embargo, dado que las variaciones son pequeñas respecto al valor promedio y los errores de los índices, al hacer la prueba χ^2 se encuentra que solo en el caso de BL Lacerta la variabilidad sería intrínseca a la fuente. Además, la amplitud de variabilidad es 2.18 (ver Tabla 4.15), que al ver el diagrama

Tabla 4.12: Resultados del estudio de variabilidad del índice espectral respecto a la fecha de observación para el color B-V.

Fuente (1)	Época (2)	Prueba χ^2 (3)	A (4)
OJ 287	59327 - 59341	False	
S4 0954+650	59327 - 59340	False	
ON 231	59326 - 59376	True	0.64
3C 273	59327 - 59376	False	
3C 279	59336 - 59376	False	
PKS 1510-089	59337 - 59376	True	0.22
DA 406	59339 - 59375	False	
Markarian 501	59326 - 59376	False	
BL Lacerta	59369 - 59376	True	0.64

NOTAS: En la columna (2) se presenta la época de observación para la cual se hace el análisis de variabilidad; en la columna (3) está el resultado de la prueba de hipótesis; y la amplitud de variabilidad, cuando es necesaria, se presenta en la columna (4).

Tabla 4.13: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas color-magnitud de la figura 4.22, con el índice de color V-R.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	$\langle\alpha\rangle(\sigma)$ (7)	Comportamiento (8)
OJ 287	13	0.04 (0.46)	0.3 (0.27)	0.63	5	1.46 (0.34)	None
S4 0954+650	12	0.08 (0.39)	0.23 (0.32)	0.77	4	2.05 (0.33)	None
ON 231	49	-0.15 (0.32)	-0.26 (0.19)	0.43	11	1.85 (0.65)	None
3C 273	48	0.3 (3.16)	0.18 (0.23)	0.66	8	0.73 (0.29)	None
3C 279	48	-0.01 (0.07)	-0.16 (0.25)	0.74	7	1.98 (0.2)	None
PKS 1510-089	38	-0.01 (0.05)	-0.16 (0.23)	0.7	8	1.77 (0.2)	None
DA 406	36	0.13 (0.39)	0.35 (0.34)	0.77	3	2.09 (0.26)	None
Markarian 501	49	-0.56 (0.67)	-0.57 (0.15)	0.11	9	2.09 (0.3)	None
BL Lacerta	6	1.18 (0.18)	0.98 (0.02)	0.12	3	1.88 (1.41)	None

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.10.

índice espectral-magnitud, corresponde con una transición a un espectro mucho más inclinado en un periodo de dos días.

ON 231 y Markarian 501 presentan tendencias relativamente estables en los periodos de observación respectivos, salvo por un punto en cada caso en el que los espectros se inclinan más respecto a la tendencia estable. Aunque estos puntos no están relacionados con estados de mayor o menor brillo respecto al resto de observaciones, como se puede observar en los diagramas de la Figura 4.23.

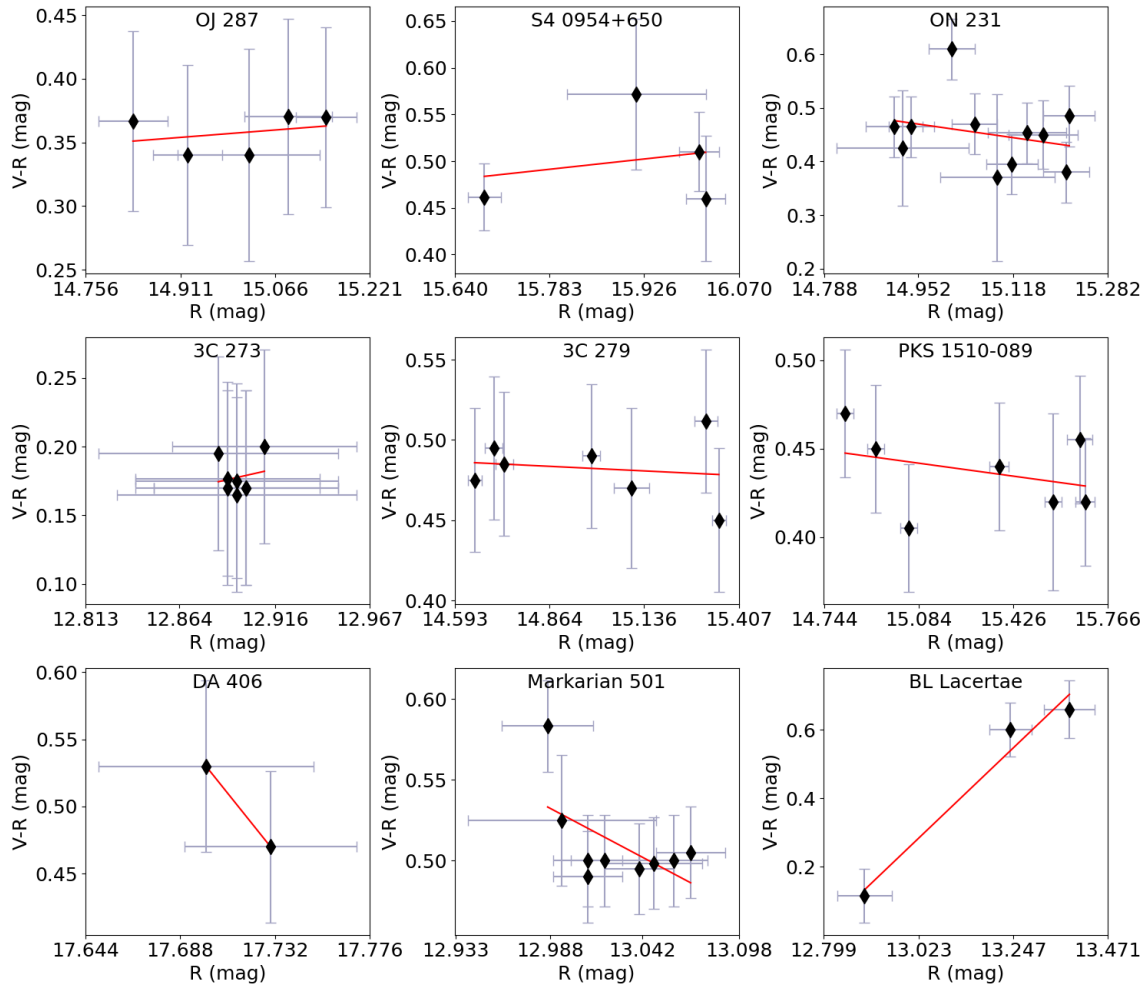


Figura 4.22: Diagramas color-magnitud para el índice de color V-R para todas las fuentes de la muestra.

R-I

En la Figura 4.25 se muestran los diagramas color-magnitud de las fuentes para este índice de color. De estos diagramas vemos que todas las fuentes presentan variabilidad en el color. Sin embargo, al hacer el análisis de correlación, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.16, se encontró que para ninguna de las fuentes se puede concluir la presencia de un estado BWB o RWB.

Entre los resultados podemos destacar lo encontrado para OJ 287, 3C 273 y PKS 1510-089, para los cuales el p -value se mantiene menor a 0.15. Para la primer fuente el coeficiente de correlación indicaría un comportamiento BWB. El problema que se presenta es que solo se tienen 4 puntos para analizar, esto repercute en el p -value, lo que lleva a una probabilidad de 14% de que no exista correlación a pesar de haber encontrado un coeficiente de correlación cercano a 1.

En el caso de 3C 273 y PKS 1510-089, con un mayor número de observaciones disponibles, el coeficiente de correlación nos indicaría un comportamiento RWB, si

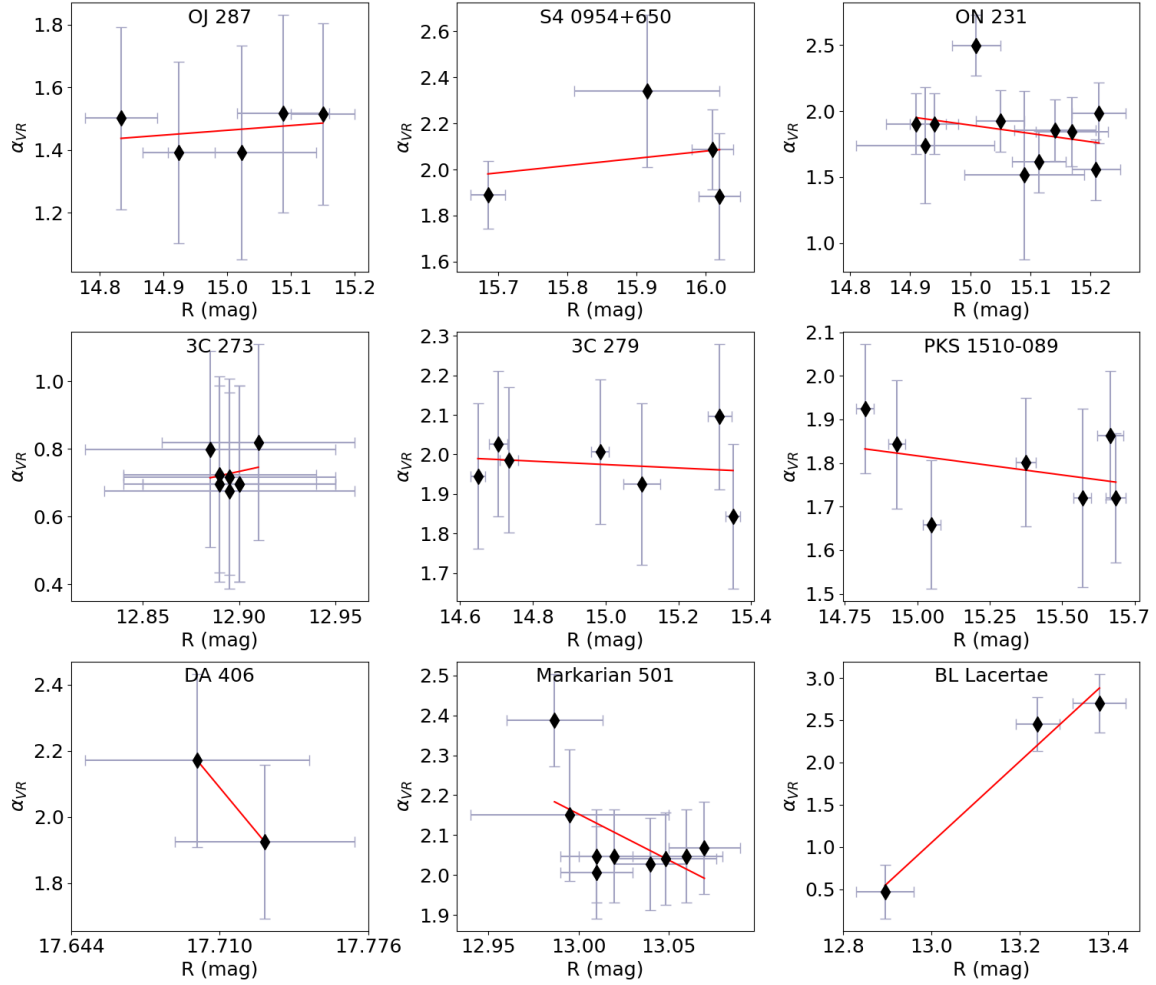


Figura 4.23: Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color V-R para todas las fuentes de la muestra.

no consideramos los p -value iguales a 0.11 y 0.13 para cada fuente respectivamente.

En la Tabla 4.16 no se reportan resultados para BL Lacerta pues, como se puede observar en la Figura 4.25, solo hay una observación disponible para este color, con lo que es imposible realizar un análisis de correlación.

En el resto de fuentes se encontró que no hay algún comportamiento que se ajuste a lo observado.

En la Figura 4.26 se muestran los diagramas índice espectral-magnitud, que son equivalentes a los diagramas color-magnitud, por lo que las observaciones y lo encontrado al hacer el estudio de correlación lleva a resultados similares a lo discutido previamente, esto se puede corroborar al analizar lo reportado en la Tabla 4.17. Para ninguna fuente se concluye la presencia de algún comportamiento específico.

En los diagramas que se presentan en la Figura 4.27 se observa que todas las fuentes muestran variaciones en el índice espectral, sin embargo, esta variabilidad no pasa la prueba de χ^2 . Por un lado, esto es porque las variaciones del índice espectral respecto al promedio son pequeñas en comparación con el tamaño del error de los

Tabla 4.14: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas índice espectral-magnitud de la Figura 4.23, considerando el índice espectral para el color V-R.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	Comportamiento (7)
OJ 287	12	0.15 (0.46)	0.3 (0.27)	0.63	5	None
S4 0954+650	11	0.31 (0.39)	0.23 (0.32)	0.77	4	None
ON 231	48	-0.63 (0.32)	-0.26 (0.19)	0.43	11	None
3C 273	47	1.24 (3.16)	0.18 (0.23)	0.66	8	None
3C 279	47	-0.04 (0.07)	-0.16 (0.25)	0.74	7	None
PKS 1510-089	37	-0.05 (0.05)	-0.16 (0.23)	0.7	8	None
DA 406	35	0.55 (0.39)	0.35 (0.34)	0.77	3	None
Markarian 501	49	-2.3 (0.67)	-0.57 (0.15)	0.11	9	None
BL Lacerta	5	4.82 (0.18)	0.98 (0.02)	0.12	3	None

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.11.

Tabla 4.15: Resultados del estudio de variabilidad del índice espectral respecto a la fecha de observación para el color V-R.

Fuente (1)	Época (2)	Prueba χ^2 (3)	A (4)
OJ 287	59327 - 59341	False	
S4 0954+650	59327 - 59340	False	
ON 231	59326 - 59376	False	
3C 273	59327 - 59376	False	
3C 279	59336 - 59376	False	
PKS 1510-089	59337 - 59376	False	
DA 406	59339 - 59375	False	
Markarian 501	59326 - 59376	False	
BL Lacerta	59369 - 59376	True	2.18

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.12.

mismos, así que la probabilidad de que estas variaciones sean intrínsecas a la fuente es menor al corte que hemos impuesto para determinar variabilidad, que es del 99 %. Los resultados de la prueba estadística para la determinación de variabilidad se encuentran en la Tabla 4.18.

B-I

Notemos que este color toma en cuenta los extremos del intervalo en el óptico para el que se hacen las observaciones, se están comparando los filtros de mayor y menor longitud de onda.

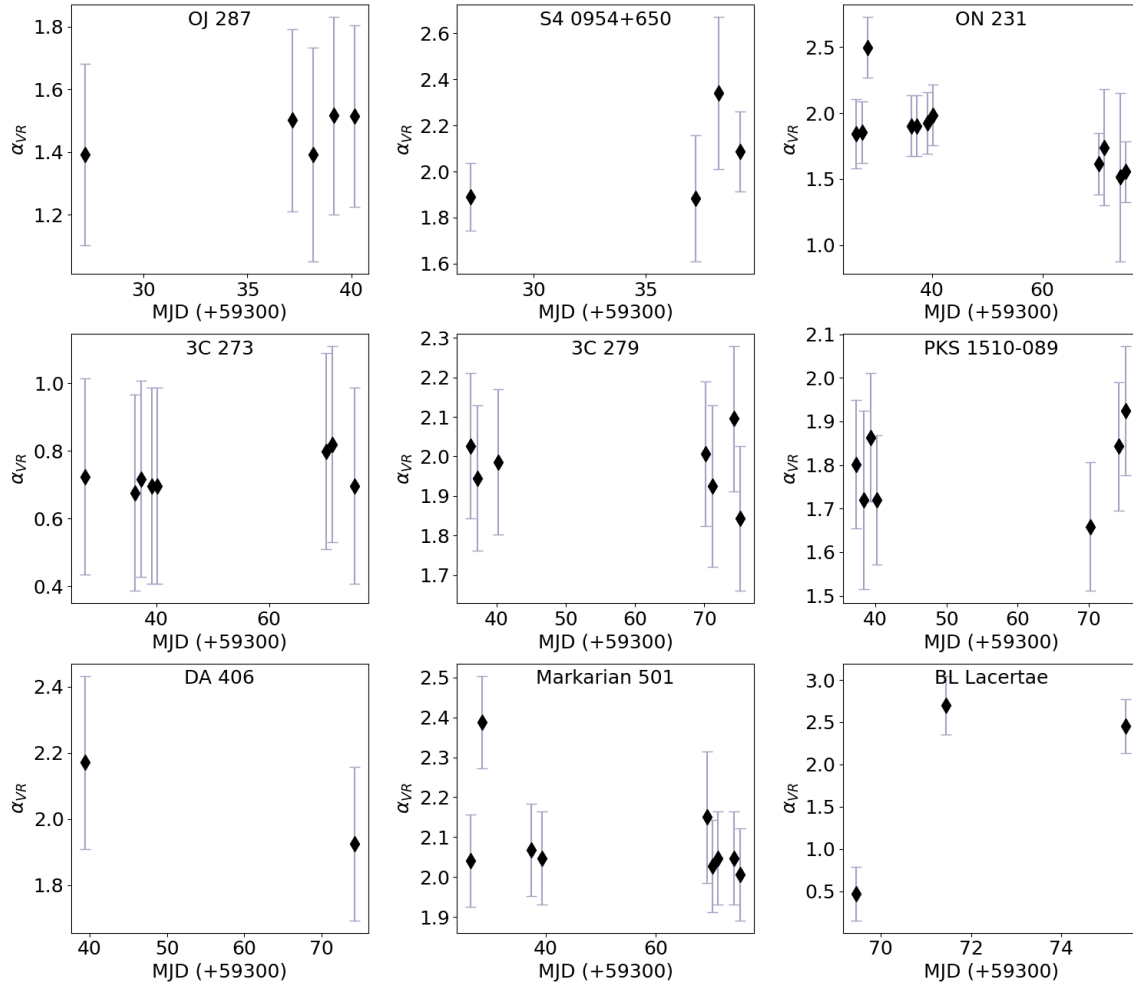


Figura 4.24: Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color V-R para todas las fuentes de la muestra.

Con las observaciones disponibles, para el color B-I se encontró que ninguna de las fuentes cumple los criterios para asociarle un comportamiento con base en los diagramas color-magnitud, que se muestran en la Figura 4.28. Sin embargo, hay cuatro fuentes cuyos p -values indican probabilidades mayores al 90 % de que haya correlación entre el color y la magnitud de la fuente, estas son OJ 287, 3C 273, PKS 1510-089 y Markarian 501, como se puede ver en la Tabla 4.19.

Entre las cuatro fuentes, OJ 287 es la única para la que las observaciones indicarían un comportamiento BWB, además que la correlación que se encuentra es muy fuerte, pues el coeficiente de correlación es 0.96.

Para las otras tres fuentes, el valor del coeficiente de correlación indicaría un comportamiento RWB. Es en particular interesante el diagrama color-magnitud de Markarian 501, en el que se tiene una observación con un brillo mayor que el promedio correspondiente a un valor mayor del color, que está asociado con un valor mayor del índice espectral, que se traduce en un espectro más inclinado para el estado de actividad correspondiente.

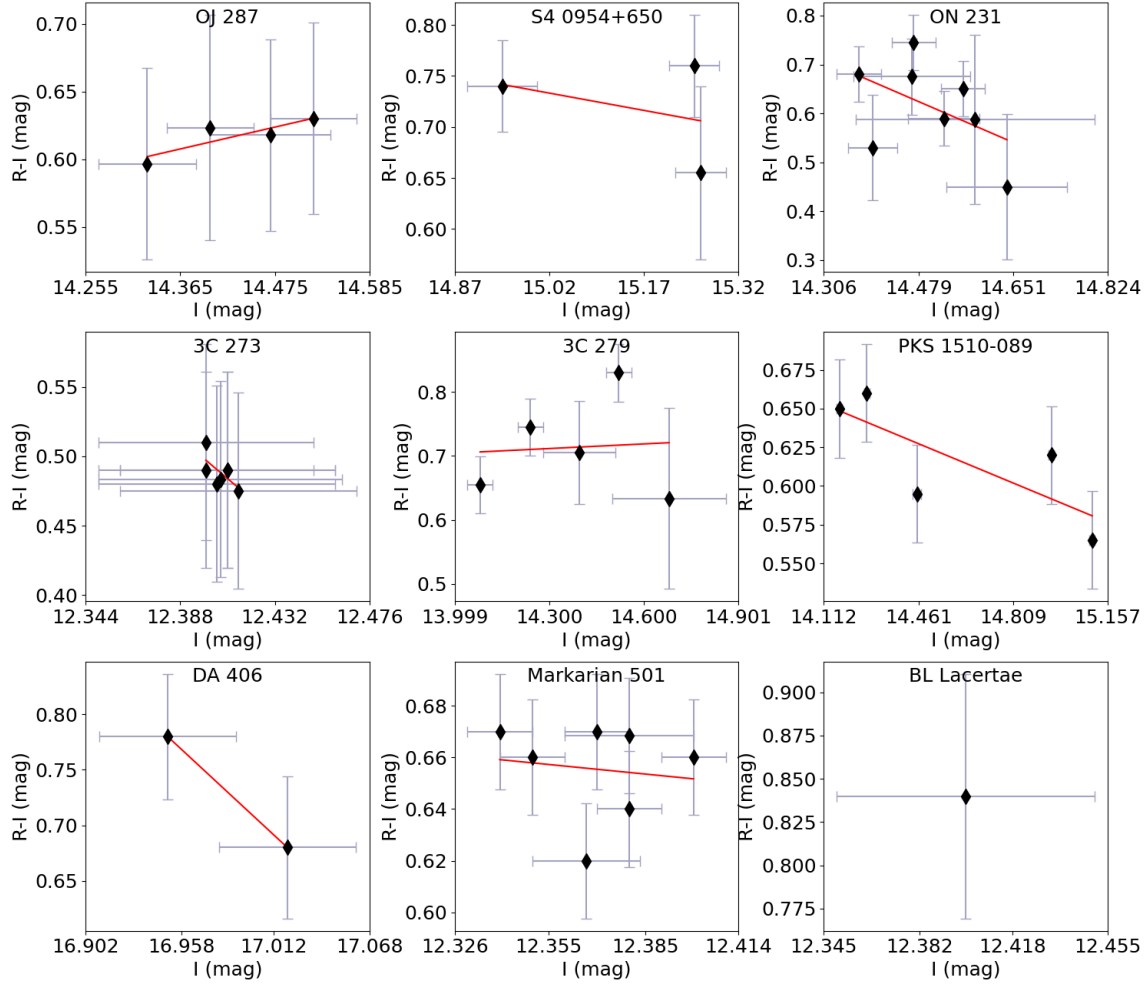


Figura 4.25: Diagramas color-magnitud para el índice de color R-I para todas las fuentes de la muestra.

El resto de fuentes muestran coeficientes de correlación y p -values con los que se concluye que no hay correlación entre el color y la magnitud. Y en el caso de BL Lacerta no se realizó un estudio de correlación pues solo se tiene una observación de esta fuente.

Como en los colores anteriores, los diagramas índice espectral-magnitud son equivalentes a los diagramas color-magnitud. Se presentan en la Figura 4.29. Los resultados del estudio de correlación, reportados en la Tabla 4.20, muestran lo que ya se mencionaba en el análisis anterior, para las fuentes con posibles comportamientos RWB se observa una tendencia SWB, mientras que para OJ 287, que presenta un posible comportamiento BWB, se tendría una tendencia FWB, aunque por los p -values no se puedan concluir estos comportamientos con la certeza buscada con los criterios iniciales.

En los diagramas de la Figura 4.30 observamos que todas las fuentes presentan variaciones del índice espectral en el tiempo, sin embargo, al hacer la prueba de χ^2 solo PKS 1510-089 muestra una variabilidad considerable respecto al promedio del índice

Tabla 4.16: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas color-magnitud de la figura 4.25, con el índice de color R-I.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	$\langle\alpha\rangle(\sigma)$ (7)	Comportamiento (8)
OJ 287	13	0.15 (0.48)	0.86 (0.09)	0.14	4	1.04 (0.14)	None
S4 0954+650	12	-0.11 (0.22)	-0.36 (0.34)	0.76	3	1.21 (0.14)	None
ON 231	49	-0.48 (0.89)	-0.48 (0.18)	0.23	8	1.03 (0.29)	None
3C 273	48	-1.32 (4.19)	-0.65 (0.15)	0.11	7	0.82 (0.12)	None
3C 279	48	0.02 (0.38)	0.07 (0.3)	0.91	5	1.2 (0.24)	None
PKS 1510-089	38	-0.07 (0.02)	-0.77 (0.12)	0.13	5	1.04 (0.09)	None
DA 406	36	-1.43 (0)	-1.0 (0.0)	1.0	2	1.23 (0.11)	None
Markarian 501	49	-0.12 (0.41)	-0.13 (0.25)	0.78	7	1.1 (0.06)	None

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.10. BL Lacerta no aparece en esta tabla dado que en el diagrama solo hay un punto, como se puede apreciar en la Figura 4.25

Tabla 4.17: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas índice espectral-magnitud de la Figura 4.26, considerando el índice espectral para el color R-I.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	Comportamiento (7)
OJ 287	12	0.25 (0.48)	0.86 (0.09)	0.14	4	None
S4 0954+650	11	-0.19 (0.22)	-0.36 (0.34)	0.76	3	None
ON 231	48	-0.81 (0.89)	-0.48 (0.18)	0.23	8	None
3C 273	47	-2.22 (4.19)	-0.65 (0.15)	0.11	7	None
3C 279	47	0.04 (0.38)	0.07 (0.3)	0.91	5	None
PKS 1510-089	37	-0.12 (0.02)	-0.77 (0.12)	0.13	5	None
DA 406	35	-2.41 (0)	-1.0 (0.0)	1.0	2	None
Markarian 501	49	-0.21 (0.41)	-0.13 (0.25)	0.78	7	None

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.11. De nuevo no aparece BL Lacerta por lo descrito en la tabla 4.16.

espectral y los errores de los índices, mostrando además una amplitud de variabilidad de 0.17.

Markarian 501 presenta un caso interesante, pues las variaciones observadas en el índice espectral son considerables. Tomando criterios más débiles respecto a la significancia de la prueba de χ^2 se podría encontrar que presenta variabilidad intrínseca. En esta fuente se observa un primer crecimiento del índice espectral que tiene una caída considerable en un corto periodo de tiempo, para después mantenerse estable en las siguientes observaciones.

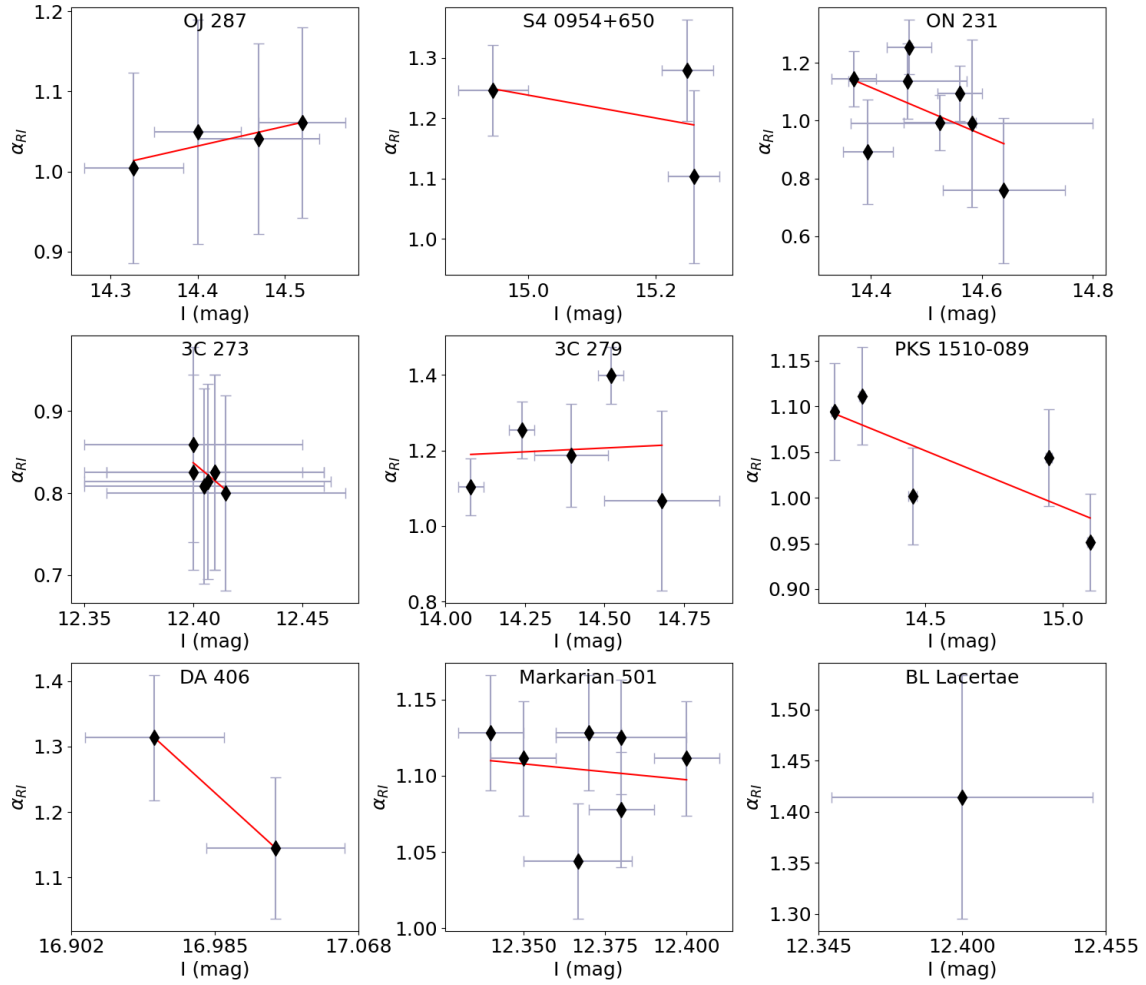


Figura 4.26: Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color R-I para todas las fuentes de la muestra.

Tabla 4.18: Resultados del estudio de variabilidad del índice espectral respecto a la fecha de observación para el color R-I.

Fuente (1)	Época (2)	Prueba χ^2 (3)	A (4)
OJ 287	59327 - 59341	False	
S4 0954+650	59327 - 59340	False	
ON 231	59326 - 59376	False	
3C 273	59327 - 59375	False	
3C 279	59340 - 59376	False	
PKS 1510-089	59338 - 59376	False	
DA 406	59339 - 59375	False	
Markarian 501	59326 - 59376	False	

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.12. Como en las tablas anteriores, no aparece BL Lacerta por falta de información.

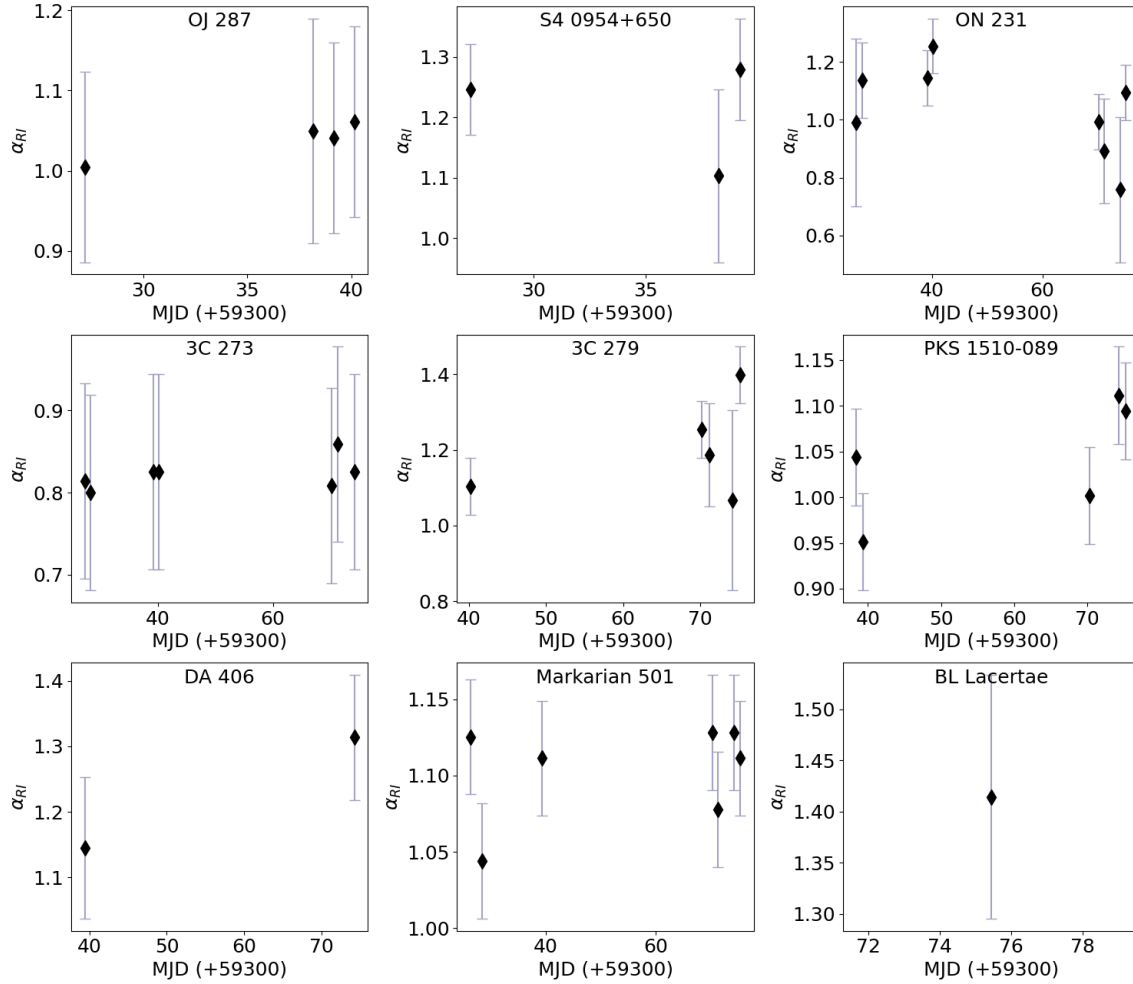


Figura 4.27: Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color R-I para todas las fuentes de la muestra.

Tabla 4.19: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas color-magnitud de la figura 4.28, con el índice de color B-I.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	$\langle\alpha\rangle(\sigma)$ (7)	Comportamiento (8)
OJ 287	13	0.54 (0.48)	0.96 (0.03)	0.04	4	0.85 (0.05)	None
S4 0954+650	12	-0.27 (0.22)	-0.35 (0.34)	0.77	3	1.21 (0.1)	None
ON 231	49	-0.11 (0.54)	-0.26 (0.2)	0.47	10	1.09 (0.11)	None
3C 273	48	-1.88 (4.86)	-0.69 (0.13)	0.08	7	0.53 (0.05)	None
3C 279	48	0.06 (0.32)	0.18 (0.25)	0.7	7	1.08 (0.09)	None
PKS 1510-089	38	-0.19 (0.02)	-0.76 (0.12)	0.08	6	0.96 (0.09)	None
DA 406	36	-1.71 (0)	-1.0 (0.0)	1.0	2	0.99 (0.04)	None
Markarian 501	49	-0.93 (0.34)	-0.63 (0.13)	0.05	10	1.26 (0.07)	None

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.10. Para esta tabla y las siguientes tampoco aparece BL Lacerta por las mismas razones que en el índice R-I.

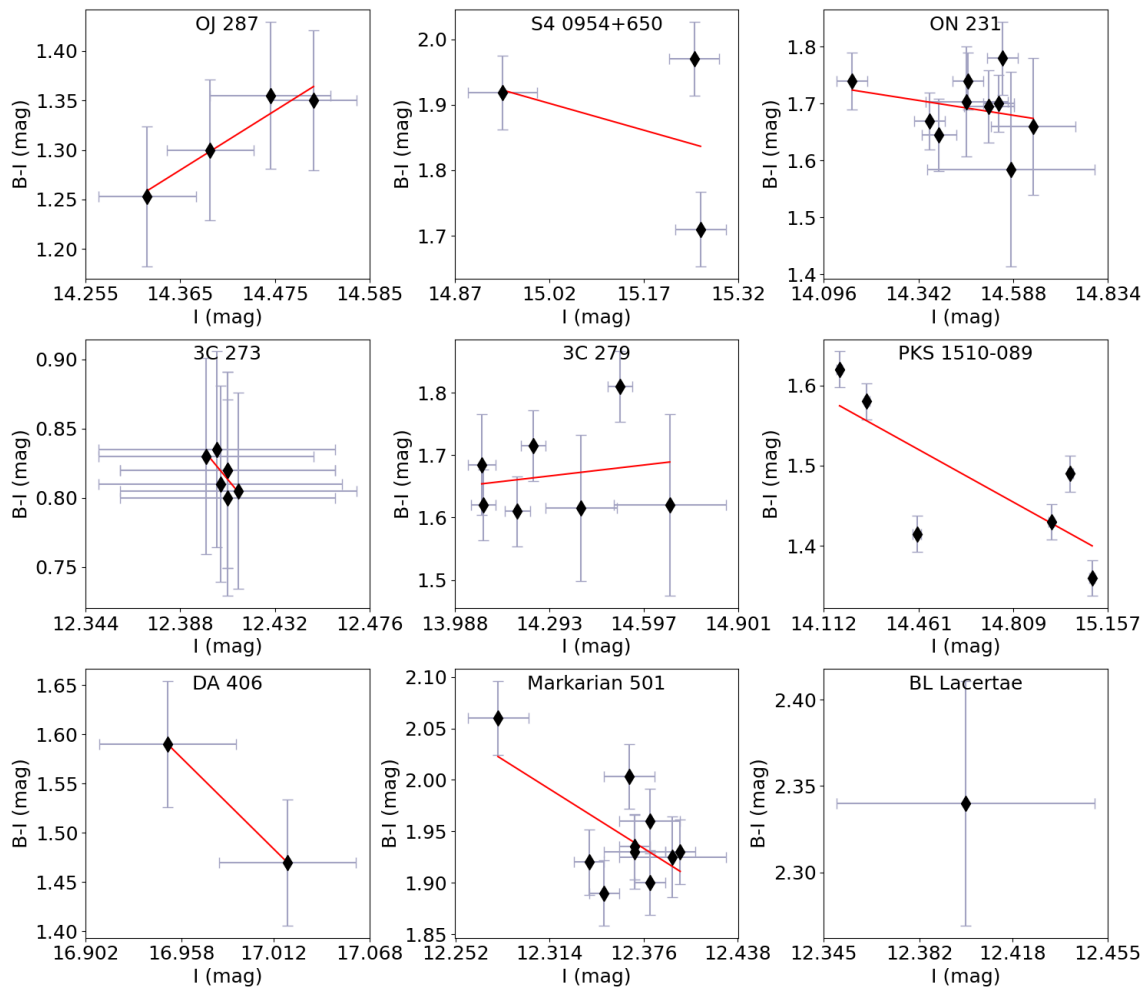


Figura 4.28: Diagramas color-magnitud para el índice de color B-I para todas las fuentes de la muestra.

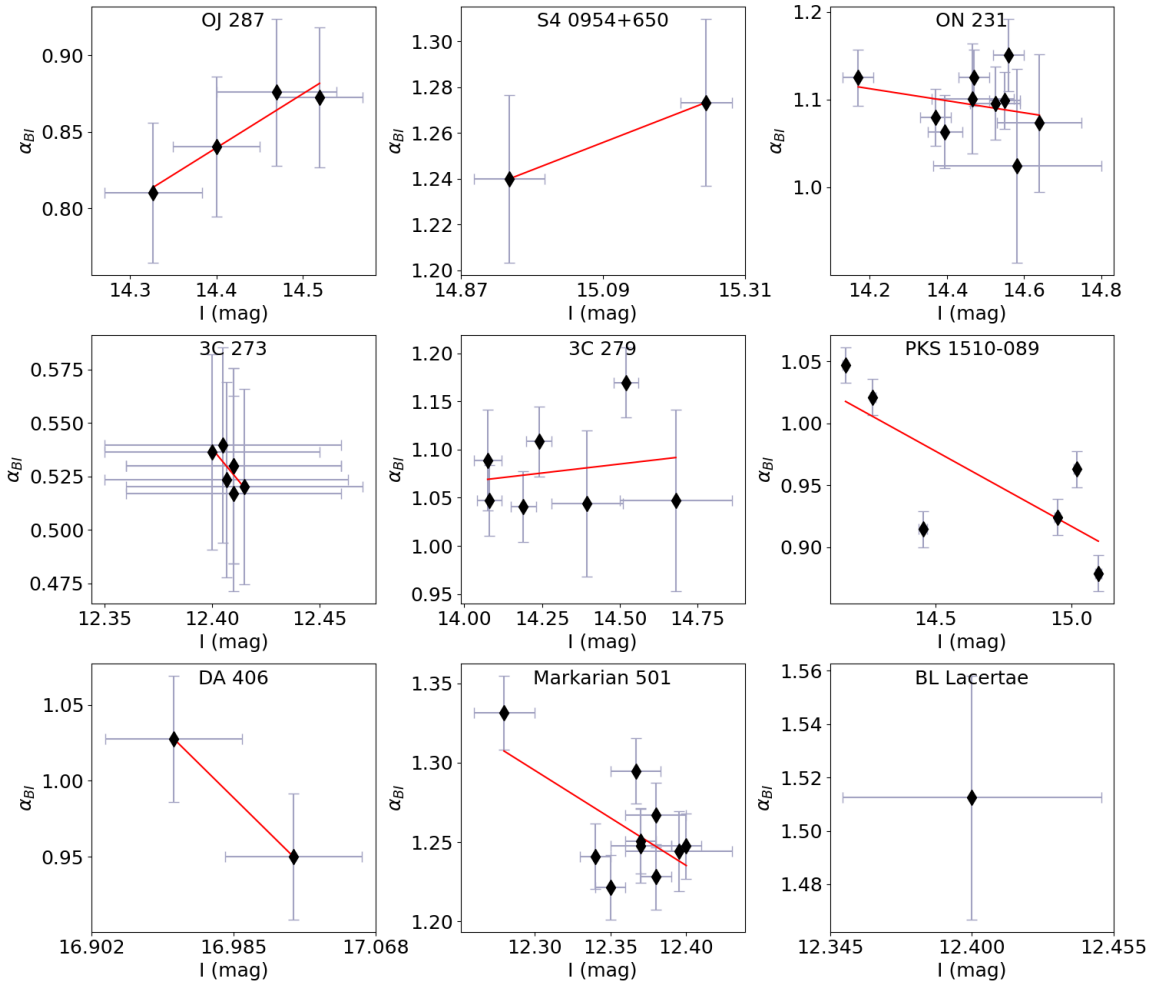


Figura 4.29: Diagramas índice espectral-magnitud para el índice de color B-I para todas las fuentes de la muestra.

Tabla 4.20: Resultados obtenidos en el estudio de correlación para los diagramas índice espectral-magnitud de la Figura 4.29, considerando el índice espectral para el color V-R.

Fuente (1)	ΔT [d] (2)	$S(\sigma)$ (3)	$r(\sigma)$ (4)	p (5)	N (6)	Comportamiento (7)
OJ 287	12	0.35 (0.48)	0.96 (0.03)	0.04	4	None
S4 0954+650	11	-0.18 (0.22)	-0.35 (0.34)	0.77	3	None
ON 231	48	-0.07 (0.54)	-0.26 (0.2)	0.47	10	None
3C 273	47	-1.21 (4.86)	-0.69 (0.13)	0.08	7	None
3C 279	47	0.04 (0.32)	0.18 (0.25)	0.7	7	None
PKS 1510-089	37	-0.12 (0.02)	-0.76 (0.12)	0.08	6	None
DA 406	35	-1.11 (0)	-1.0 (0.0)	1.0	2	None
Markarian 501	49	-0.6 (0.34)	-0.63 (0.13)	0.05	10	None

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.11.

Tabla 4.21: Resultados del estudio de variabilidad del índice espectral respecto a la fecha de observación para el color B-I.

Fuente (1)	Época (2)	Prueba χ^2 (3)	A (4)
OJ 287	59327 - 59341	False	
S4 0954+650	59327 - 59340	False	
ON 231	59326 - 59376	False	
3C 273	59327 - 59375	False	
3C 279	59339 - 59376	False	
PKS 1510-089	59338 - 59376	True	0.17
DA 406	59339 - 59375	False	
Markarian 501	59326 - 59376	False	

NOTAS: La descripción completa de la tabla y la información contenida en las columnas está descrita en la Tabla 4.12. Como en las tablas anteriores, no aparece BL Lacerta por falta de información.

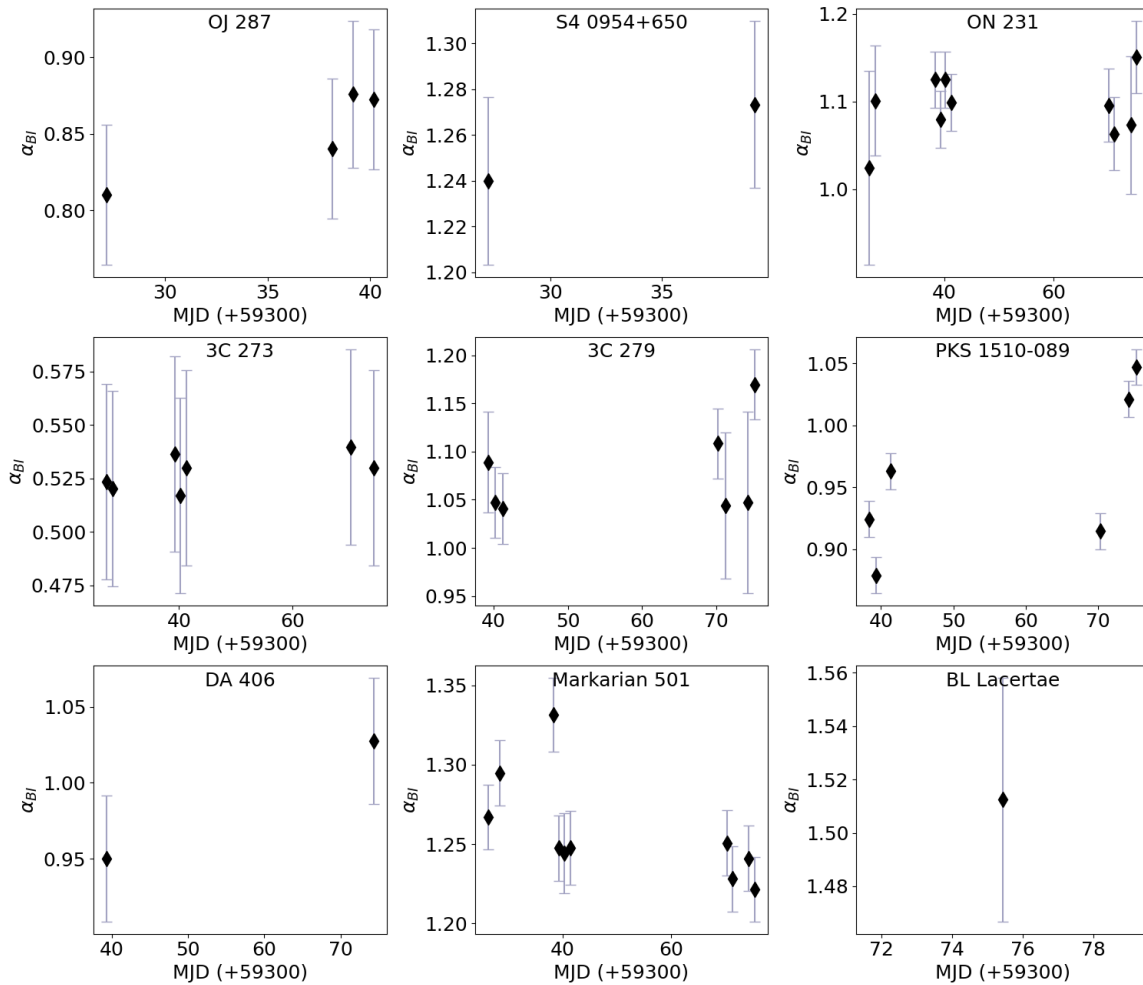


Figura 4.30: Gráficas del índice espectral contra el día para el índice de color B-I para todas las fuentes de la muestra.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Discusión y conclusiones

Respecto a la variabilidad en el flujo de la muestra de blázares, la mayoría de las fuentes presentan variabilidad en al menos uno de los periodos durante los que se observó. Son tres las fuentes en las que no se encontró variabilidad en ninguno de los periodos, estas son 3C 273, DA 406 y Markarian 501.

En el caso de 3C 273, el resultado es inusual respecto a estudios previos que se han realizado de esta fuente. El hecho de que para los cuatro filtros utilizados el brillo de la fuente se mantenga prácticamente constante durante los tres meses de observación es un resultado sobre el que se podría profundizar más, comparando esta actividad con lo reportado en otras longitudes de onda para estos mismos periodos de tiempo, buscando posibles estabilidades de la fuente.

Con DA 406, el problema para determinar variabilidad está relacionado a la cantidad de observaciones obtenidas de la fuente, pues el mayor número de noches en las que se tienen datos para un mismo filtro es de 3. Con esto, realizar estudios de variabilidad es complejo, además que los posibles resultados que se encuentren no son estadísticamente representativos de la fuente.

En Markarian 501 tenemos un caso particular, pues es un blázar relativamente cercano a la Tierra, esto tiene repercusiones en la forma en la que se observa, y en particular en la distinción de las contribuciones al flujo del núcleo y del resto de la galaxia. En particular, para hacer un correcto estudio de las emisiones del núcleo de Markarian 501, es necesario hacer correcciones por galaxia huésped al flujo que se mide, pues la contribución de esta es considerable. Para tener entonces un correcto análisis de curvas de luz es necesario hacer estas correcciones. Esto escapa del objetivo de este trabajo, empero representa una oportunidad de profundización respecto a la actividad de esta fuente.

Para las fuentes que sí presentan variación se tienen diferentes valores para las amplitudes, además de las diferencias presentes en cada filtro por fuente. Lo mismo ocurre en el caso de las escalas mínimas de variabilidad, donde para cada filtro de una misma fuente se pueden encontrar resultados diferentes, en algunos casos considerablemente diferentes.

En este sentido hay casos destacables. Respecto a las amplitudes de variabilidad, se tiene el caso de 3C 279, que presentó una de 0.58 magnitudes en el filtro I en las observaciones de junio, al comparar esto con la amplitud de 0.41 magnitudes en el filtro B vemos cambios considerables, aunque estos dos representan los filtros con mayor diferencia en la longitud de onda central. Un factor a considerar en este periodo de observaciones es que se tienen variaciones considerables en una misma noche para los diferentes filtros, estas afectan en los cálculos de las mínimas escalas de variabilidad, de ahí que también haya grandes diferencias en este aspecto para los diferentes filtros en un mismo periodo de observación.

Ocurre algo similar con BL Lacerta, pues se encontró que presentaba una amplitud de variabilidad de 1.03 magnitudes en el filtro V, que es un valor muy grande en comparación con los encontrados para otros blázares de la muestra. Sería interesante completar la curva de luz con los días faltantes para estudiar de mejor manera cómo fue la variación de la actividad de la fuente en este periodo, en particular para identificar un posible mínimo en el brillo de la fuente, y posiblemente encontrar una amplitud de variabilidad mayor.

Los resultados en general satisfacen lo esperado para los blázares, pues como se ha descrito en capítulos anteriores, estos forman parte de las fuentes más variables en el Universo, y tienden a mostrar variabilidad en diversas escalas temporales.

La variabilidad detectada puede tener diversos orígenes dentro del mismo blázar, entre estos destacan el jet y el disco de acreción. Un objetivo importante en los estudios de variabilidad es establecer criterios para distinguir cuándo la variabilidad estaría asociada al jet y cuándo al disco de acreción. Por ejemplo, Bauer et al. (2009) sugieren imponer un corte a 0.4 magnitudes, en la amplitud dada por (3.6), para diferenciar las fuertes fluctuaciones del blázar asociadas al jet de las debidas a llamaradas del disco de acreción, típicas del comportamiento de los QSOs. Este criterio está basado en una comparación hecha con resultados de un estudio previo para las amplitudes de variabilidad mostradas por cuásares tipo I y blázares.

Sobre los resultados de los estudios de variabilidad espectral y de color es relevante profundizar en la equivalencia entre los diagramas color-magnitud y los diagramas índice espectral-magnitud. Basta recordar que para obtener una expresión para el índice espectral se parte del supuesto de conocer el valor del flujo, o la magnitud, en las dos longitudes de onda que definen los extremos del intervalo en el que se busca describir a la SED como una ley de potencias. Este supuesto es el que lleva a una dependencia directa entre el índice espectral y el color asociado a dicho índice, como se puede observar en la ecuación (3.14).

Es esta expresión la que conduce a la equivalencia entre los dos diagramas, pues al tener una dependencia lineal entre el índice espectral y el color, el coeficiente de correlación, por cómo se define, tendrá exactamente el mismo valor. Esto se interpreta como que la correlación entre el color y la magnitud es la misma que entre el índice espectral y la magnitud, pues el coeficiente de correlación es independiente de las constantes por las que se puedan multiplicar las variables de las que se busca la correlación.

Esta situación trae como resultado otra equivalencia entre los comportamientos, pues de nuevo por la relación entre el color y el índice espectral tenemos que un

comportamiento RWB en el diagrama color-magnitud es equivalente a un comportamiento SWB, mientras que un comportamiento BWB es equivalente a uno FWB. Esto aplica para este trabajo por los índices de color elegidos, pues en todos los casos se toman diferencias de un filtro de menor longitud de onda con uno de mayor.

Lo anterior se ve reflejado en todos los análisis de correlación realizados en la muestra, pues como se puede notar de las tablas de resultados, los estadísticos en los diagramas color-magnitud e índice espectral-magnitud son iguales, salvo las pendientes de los ajustes.

A pesar de esto, se decidió incluir el análisis de los diagramas índice espectral-magnitud para mostrar todos los resultados que es posible obtener de este tipo de estudios, así como ver claramente cómo varía el índice espectral respecto al estado de actividad de la fuente.

En casi todas las SED que se presentaron se observan variaciones en la forma de la misma a lo largo de las noches de observación, en algunos casos variaciones que presentan cierto tipo de periodicidad, como en el caso de ON 231 (Figura 3.2), y en general las variaciones preservan la tendencia general del flujo respecto a la frecuencia.

En el caso de 3C 273 se presenta un comportamiento interesante en la SED, pues esta parece no seguir la tendencia que generalmente se presenta en los blázares, y que se observó en el resto de fuentes en la muestra. Las SED de 3C 273 muestran un pico de mínimo flujo en la frecuencia correspondiente al filtro R. Aunque dada la escala de los flujos y los errores de los mismos esta situación podría resultar de algún error en las mediciones.

La única fuente para la que no se puede analizar la variación de la SED es BL Lacerta, pues solo se tienen observaciones en los cuatro filtros para una noche, para el resto de noches se tienen observaciones en solo tres filtros.

En los análisis de correlación para los diferentes índices de color no hubo tantos resultados como se esperaba usando los criterios estrictos para determinar correlación, pues solo se encontró que dos fuentes tenían algún comportamiento para el color B-V. Estas fuentes fueron PKS 1510-089 y Markarian 501, el primero, un FSRQ para el que se encontró un claro comportamiento RWB, y el segundo un blázar tipo BL Lac que presentó un comportamiento BWB.

Sin embargo, si consideramos criterios más laxos respecto a la probabilidad de que la correlación encontrada en realidad no exista, hay tres fuentes más para las que se encuentran resultados interesantes, que además se presentan en varios de los colores y no solo en uno. Estas fuentes son OJ 287, 3C 273 y BL Lacerta. Revisaremos lo que se encuentra para cada fuente en los diferentes colores.

Para OJ 287 se muestra una posible correlación positiva para los colores R-I y B-I, con p -values de 0.14 y 0.04 respectivamente, es decir, con probabilidades de que en realidad no exista correlación de 14% y 4%, además de mostrar una correlación alta con valores de r mayores a 0.85, aunque estos resultados se encuentran solo con 4 puntos para cada color. Por otro lado, en los colores B-V y V-R los p -values son mayores a 0.4, que son demasiado altos a pesar de tener coeficientes de correlación de 0.49 y 0.3, que indicarían una dependencia lineal moderada, y se tiene una mayor cantidad de puntos en los diagramas. Si considerásemos solo el valor del coeficiente de correlación estaríamos tentados a concluir que OJ 287 muestra una tendencia

BWB en todos los colores, sin embargo, debido a los p -values debe considerarse la posibilidad de que la correlación encontrada sea debida al azar. Recordando que OJ 287 ha mostrado tanto tendencias RWB como BWB, este resultado contribuye a esta dualidad, con una predilección a un comportamiento BWB.

Para los colores B-V y V-R se tienen observaciones de 8 noches de 3C 273, y en estos filtros se puede asegurar con buena certeza que no hay correlación alguna, pues los p -values son mayores a 0.6 y los coeficientes de correlación, aunque positivos, son menores a 0.2. Sin embargo, con los diagramas de los colores R-I y B-I se tienen resultados que indicarían una correlación negativa moderada con p -values por debajo de 0.15, que podría traducirse en un comportamiento RWB típico de los FSRQ. Un problema en este caso es que para estos colores solo se tienen 7 puntos en los diagramas, lo que en general implicaría resultados menos representativos del blázar. El resultado contrasta con lo reportado en estudios anteriores para estudios de LTV y STV, donde se habían encontrado comportamientos BWB, aunque en escalas similares a la estudiada en este trabajo se ha reportado la presencia de ambos comportamientos.

Las fuente PKS 1510-089 es la que tiene mejores resultados en el estudio, pues para los cuatro colores utilizados se encontraron coeficientes de correlación que indican un comportamiento RWB, obteniendo el peor resultado en el color V-R donde el p -value es de 0.46. Sin embargo, dado que para el color B-V se tiene una mayor cantidad de puntos que en cualquier otro, el resultado que se encuentra es el que tiene mayor relevancia, que además satisface incluso los criterios estrictos para determinar el comportamiento RWB. Este resultado coincide con lo que se ha detectado en general para los FSRQ, y en particular con los resultados previos para este blázar.

Markarian 501 presenta los resultados más interesantes en la muestra, aunque considerando que no se realizó la corrección por galaxia huésped, deben tomarse con precaución. Por un lado, del color B-V se dedujo un comportamiento BWB incluso bajo los criterios más estrictos. Mientras que al considerar los colores V-R y B-I se obtiene una correlación negativa, indicando un posible comportamiento RWB, pero los p -values son 0.11 y 0.05 respectivamente, con lo que las probabilidades de que esta correlación sea resultado de aleatoriedad es considerable, además que para estos dos colores se tienen menos observaciones disponibles para los análisis de correlación. En este sentido, el resultado más significativo es el obtenido con el color B-V, que contribuye a una decantación hacia el comportamiento BWB pensando en que en diferentes estudios previos ha mostrado ambos comportamientos.

En el caso de BL Lacerta solo se pudo realizar el análisis de correlación para los colores B-V y V-R, pues para el filtro I solo se tiene la observación de una noche, con lo que en los diagramas color-magnitud para los colores R-I y B-I solo hay un punto. Para los dos colores en los que sí se hizo un análisis de correlación se tienen 3 puntos en cada caso. Con el color B-V se determinó una fuerte correlación negativa, aunque con un p -value de 0.13, que indicaría un posible comportamiento RWB. Por otro lado, para el color V-R se encontró una fuerte correlación positiva, señal de un comportamiento BWB, con un p -value de 0.12. Y aunque las probabilidades de que no exista correlación son mayores al 10 %, es interesante que los resultados sean tan distintos de un color a otro, pues los coeficientes de correlación son muy cercanos, en valor absoluto, a 1. Sin embargo, dada la cantidad de puntos, estos resultados no son

estadísticamente significativos ni representativos.

De estas cinco fuentes con posibles comportamientos tenemos que los dos FSRQ muestran principalmente tendencias RWB. Por otro lado, para dos de los blázares tipo BL Lac, la conclusión principal es que muestran un posible comportamiento BWB. Y en el caso de BL Lacerta se tiene una situación inconclusa. En general vemos que se siguen las tendencias que se suelen reportar para los blázares, es decir, se asocia un comportamiento RWB a los FSRQ mientras que los tipo BL Lac suelen tener tendencias BWB, aunque esta última correspondencia es menos clara que la encontrada para FSRQ.

Al estudiar las variaciones del índice espectral respecto al tiempo, encontramos que solo tres fuentes de la muestra presentaron variaciones estadísticamente significativas para al menos uno de los colores analizados.

Sin embargo, a pesar de no pasar la prueba de χ^2 , para todas las fuentes se pueden observar cambios en el índice espectral, siendo algunos cambios más grandes. Esto nos habla de que los blázares no solo presentan fuertes y continuas variaciones en el flujo que emiten, sino también en la forma de su SED, que es precisamente lo que llamamos variabilidad espectral.

El caso más interesante de variabilidad espectral es el que presenta BL Lacerta con el color V-R, donde se encontró una amplitud de variación de 2.18, que corresponde a un espectro muy plano para la primer noche de observación que posteriormente se inclina considerablemente para las dos noches siguientes. Y aunque las observaciones no son de noches seguidas, la variación existe y sería interesante complementar con las noches faltantes para estudiar la forma en la que ocurrió el cambio de índice espectral.

5.2. Trabajo futuro

Dada la cantidad de observaciones que se tienen para algunas fuentes, la oportunidad inmediata de profundizar este trabajo es complementando las observaciones obtenidas en el Observatorio de San Pedro Mártir con los datos de otros observatorios alrededor del planeta. Esto es, buscar en diferentes bases de datos observaciones realizadas en noches cercanas a las aquí estudiadas, de esta manera se puede tener una mejor idea del comportamiento de las fuentes en cada periodo, así como complementar los diagramas color magnitud y obtener mejores resultados respecto a posibles tendencias en los mismos. Esto se está trabajando para un artículo por Mora y colaboradores, en el que además se publicarán todas las observaciones utilizadas en este trabajo.

También es posible avanzar hacia un estudio de la SED de las fuentes. En este caso, buscando observaciones cuasi-simultáneas en otras longitudes de onda, desde radio hasta rayos γ . Con esto se puede profundizar en los cambios multibanda que hay en la SED en términos del estado de actividad de la fuente.

Realizando observaciones periódicas de larga duración se pueden encontrar comportamientos diferentes en los diagramas color-magnitud, además de que las observaciones pueden contribuir a las curvas de luz de cada una de las fuentes en los diferentes filtros para escalas temporales muy largas, lo que ayudaría a los estudios

de variabilidad que se realizan en periodos de décadas.

Respecto a los códigos desarrollados y utilizados, la mayoría de estos están pensados para que sean utilizados en estudios similares con más datos y para diferentes fuentes, además de permitir la personalización de algunos de los criterios estadísticos para determinar variabilidad o correlación, lo que permitiría que en otros estudios se puedan establecer criterios más estrictos o laxos en función de lo buscado por el o la autora en cuestión. Ejemplos de estos son los Códigos 3.4 y 3.12.

Para lograr un mejor funcionamiento de los códigos, así como hacerlos de fácil acceso para los usuarios se optimizarán algunas de las funciones creadas y se generará una documentación apropiada para el uso y manejo de las herramientas creadas.

Con los códigos desarrollados en este trabajo se pueden hacer estudios para grandes muestras de blázares, por lo que es posible realizar un estudio que involucre una gran cantidad de fuentes, con varias observaciones en el óptico en busca de una posible relación entre el comportamiento que se deduce de los diagramas color-magnitud y el tipo de blázar, es decir, estudiar si en FSRQs es más común encontrar tendencias RWB o BWB, y lo mismo para blázares tipo BL Lac. Para esto es necesario obtener las observaciones de las grandes bases de datos de cada una de las fuentes a estudiar.

Capítulo 6

Apéndices

6.1. SEDs

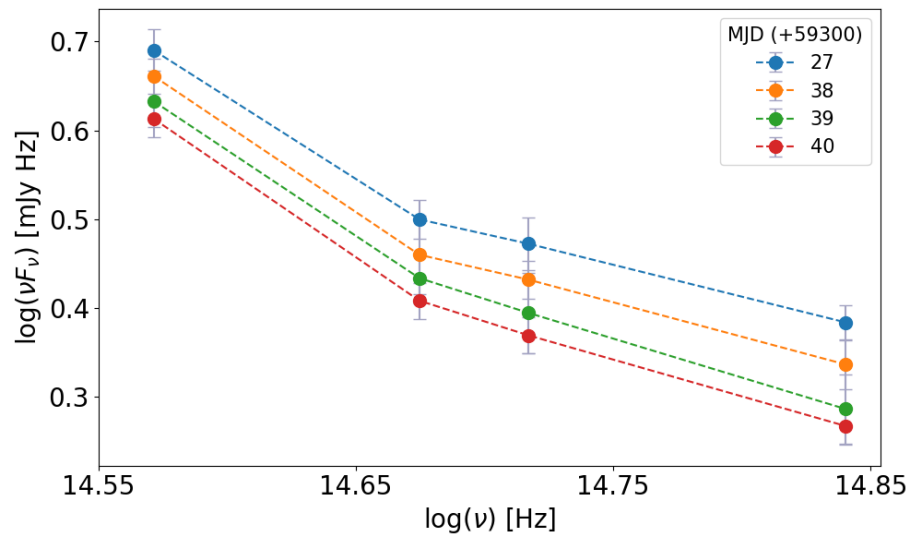


Figura 6.1: Distribución espectral de energía de OJ 287 para diferentes épocas de observación.

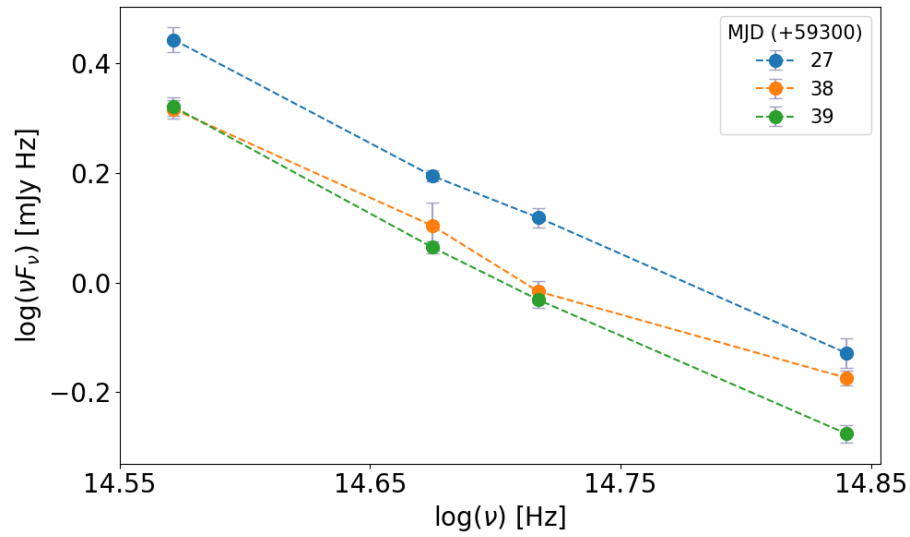


Figura 6.2: Distribución espectral de energía de S4 0954+65 para diferentes épocas de observación.

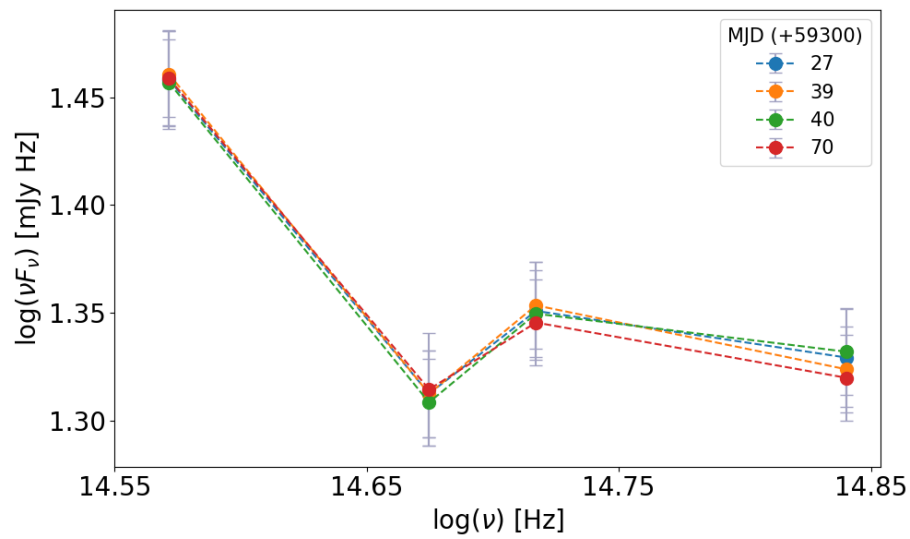


Figura 6.3: Distribución espectral de energía de 3C 273 para diferentes épocas de observación.

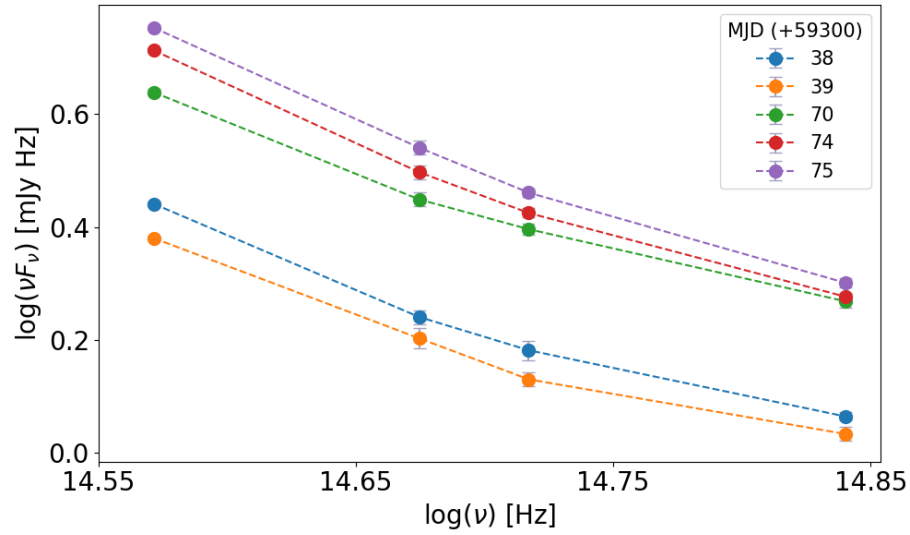


Figura 6.4: Distribución espectral de energía de PKS 1510-089 para diferentes épocas de observación.

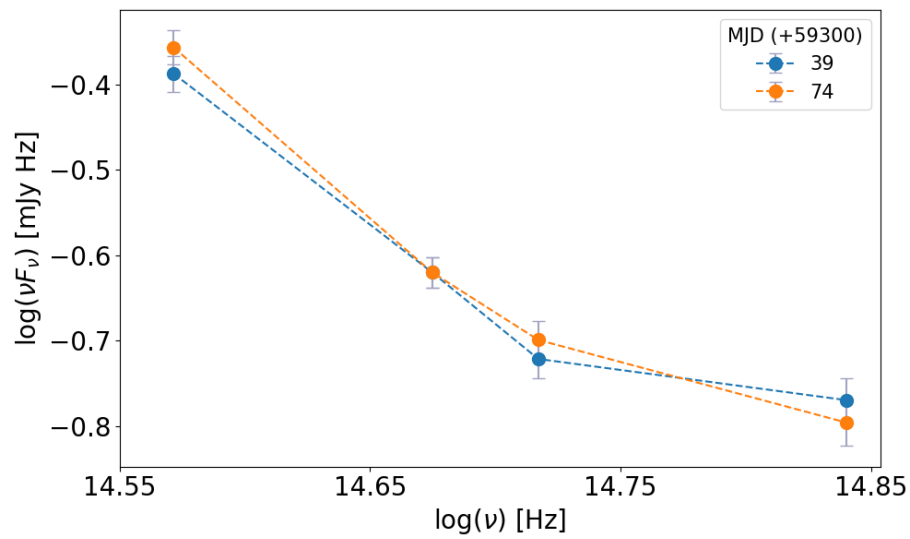


Figura 6.5: Distribución espectral de energía de DA 406 para diferentes épocas de observación.

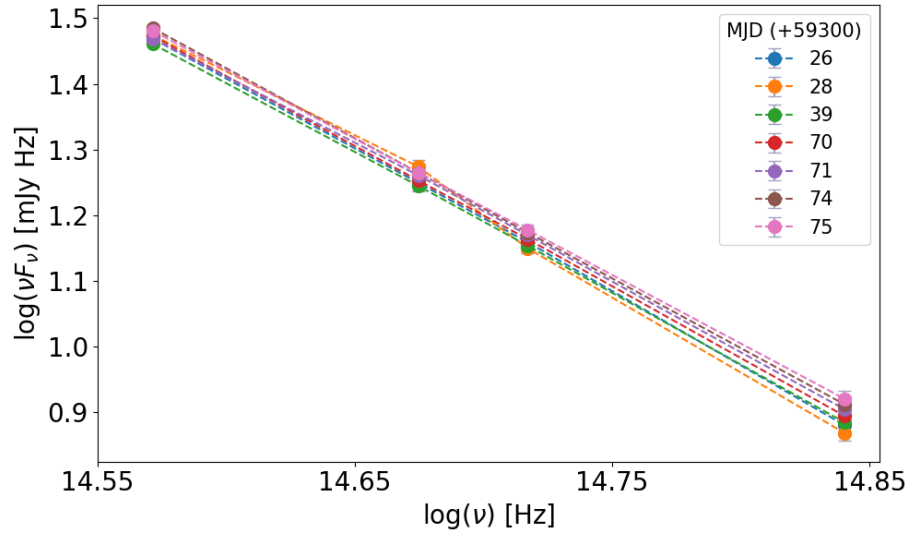


Figura 6.6: Distribución espectral de energía de Markarian 501 para diferentes épocas de observación.

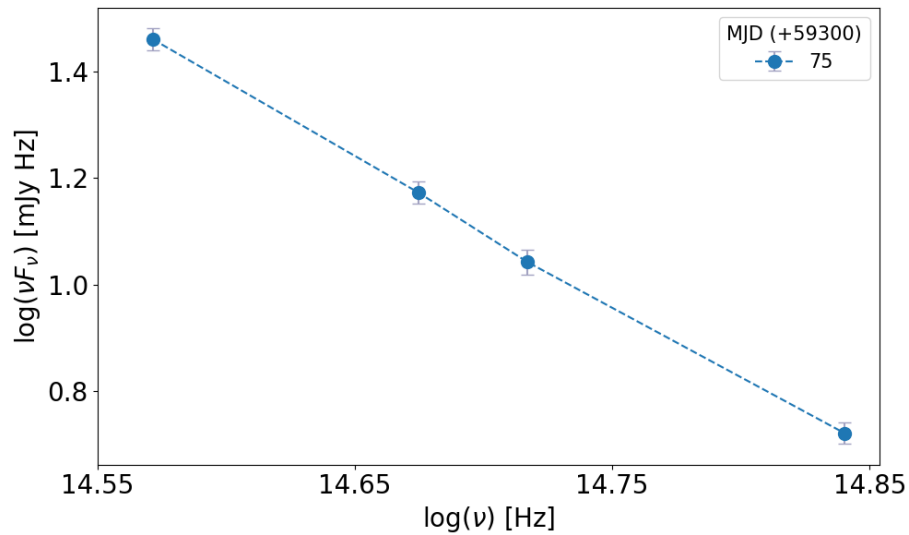


Figura 6.7: Distribución espectral de energía de BL Lacerta para la única noche en la que se tienen observaciones en los cuatro filtros.

6.2. Tablas de observaciones

Se presenta solo un ejemplo de las tablas de datos, las tablas completas se publicarán en el trabajo de Mora y colaboradores que se encuentra en preparación.

Tabla 6.1: Observaciones realizadas para OJ 287.

Filtro	MJD	Magnitud	Error	Flujo (mJy)	Error (mJy)
B	59327.17233	15.58	0.05	2.42	0.11
	59327.17591	15.58	0.05	2.42	0.11
	59327.17950	15.58	0.05	2.42	0.11
	59337.18587	15.55	0.05	2.49	0.11
	59338.15641	15.68	0.05	2.21	0.10
	-	-	-	-	-

Bibliografía

- A. A. Abdo, M. Ackermann, I. Agudo, M. Ajello, A. Allafort, H. D. Aller, M. F. Aller, E. Antolini, A. A. Arkharov, M. Axelsson, U. Bach, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, K. Bechtol, R. Bellazzini, A. Berdyugin, B. Berenji, R. D. Blandford, D. A. Blinov, E. D. Bloom, M. Boettcher, E. Bonamente, A. W. Borgland, A. Bouvier, J. Bregeon, A. Brez, M. Brigida, P. Bruel, R. Buehler, C. S. Buemi, T. H. Burnett, S. Buson, G. A. Caliandro, R. A. Cameron, P. A. Caraveo, D. Carosati, S. Carrigan, J. M. Casandjian, E. Cavazzuti, C. Cecchi, Ö. Çelik, A. Chekhtman, W. P. Chen, C. C. Cheung, J. Chiang, S. Ciprini, R. Claus, J. Cohen-Tanugi, J. Conrad, S. Corbel, L. Costamante, C. D. Dermer, A. de Angelis, F. de Palma, D. Donato, E. d. C. e. Silva, P. S. Drell, R. Dubois, D. Dumora, C. Farnier, C. Favuzzi, S. J. Fegan, E. C. Ferrara, W. B. Focke, E. Forné, P. Fortin, Y. Fukazawa, S. Funk, P. Fusco, F. Gargano, D. Gasparrini, N. Gehrels, S. Germani, B. Giebels, N. Giglietto, F. Giordano, M. Giroletti, T. Glanzman, G. Godfrey, I. A. Grenier, J. E. Grove, S. Guiriec, M. A. Gurwell, C. Gusbar, J. L. Gómez, D. Hadasch, V. A. Hagen-Thorn, M. Hayashida, E. Hays, D. Horan, R. E. Hughes, G. Jóhannesson, A. S. Johnson, W. N. Johnson, T. Kamae, H. Katagiri, J. Kataoka, N. Kawai, G. Kimeridze, J. Knödlseder, T. S. Konstantinova, E. N. Kopatskaya, E. Koptelova, Y. Y. Kovalev, O. M. Kurtanidze, M. Kuss, A. Lahteenmaki, J. Lande, V. M. Larionov, E. G. Larionova, L. V. Larionova, S. Larsson, L. Latronico, S. H. Lee, P. Leto, M. L. Lister, F. Longo, F. Loparco, B. Lott, M. N. Lovellette, P. Lubrano, G. M. Madejski, A. Makeev, E. Massaro, M. N. Mazziotta, W. McConville, J. E. McEnery, I. M. McHardy, P. F. Michelson, W. Mitthumsiri, T. Mizuno, A. A. Moiseev, C. Monte, M. E. Monzani, D. A. Morozova, A. Morselli, I. V. Moskalenko, S. Murgia, M. Naumann-Godo, M. G. Nikolashvili, P. L. Nolan, J. P. Norris, E. Nuss, M. Ohno, T. Ohsugi, A. Okumura, N. Omodei, E. Orlando, J. F. Ormes, M. Ozaki, D. Paneque, J. H. Panetta, D. Parent, M. Pasanen, V. Pelassa, M. Pepe, M. Pesce-Rollins, F. Piron, T. A. Porter, A. B. Pushkarev, S. Rainò, C. M. Raiteri, R. Rando, M. Razzano, A. Reimer, O. Reimer, R. Reinthal, J. Ripken, S. Ritz, M. Roca-Sogorb, A. Y. Rodriguez, M. Roth, P. Roustazadeh, F. Ryde, H. F. W. Sadrozinski, A. Sander, J. D. Scargle, C. Sgrò, L. A. Sigua, P. D. Smith, K. Sokolovsky, G. Spandre, P. Spinelli, J. L. Starck, M. S. Strickman, D. J. Suson, H. Takahashi, T. Takahashi, L. O. Takalo, T. Tanaka, B. Taylor, J. B. Thayer, J. G. Thayer, D. J. Thompson, L. Tibaldo, M. Tornikoski, D. F. Torres, G. Tosti, A. Tramacere, C. Trigilio, I. S. Troitsky, G. Umama, T. L. Usher, J. Vandenbroucke, V. Vasileiou, N. Vilchez, M. Villata, V. Vitale, A. P. Waite, P. Wang, B. L.

Winer, K. S. Wood, Z. Yang, T. Ylinen, and M. Ziegler. Fermi Large Area Telescope and Multi-wavelength Observations of the Flaring Activity of PKS 1510-089 between 2008 September and 2009 June. *ApJ*, 721(2):1425–1447, Oct. 2010a. doi: 10.1088/0004-637X/721/2/1425.

A. A. Abdo, M. Ackermann, I. Agudo, M. Ajello, H. D. Aller, M. F. Aller, E. Angelakis, A. A. Arkharov, M. Axelsson, U. Bach, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, B. M. Baughman, K. Bechtol, R. Bellazzini, E. Benitez, A. Berdyugin, B. Berenji, R. D. Blandford, E. D. Bloom, M. Boettcher, E. Bonamente, A. W. Borgland, J. Bregeon, A. Brez, M. Brigida, P. Bruel, T. H. Burnett, D. Burrows, S. Buson, G. A. Caliendo, L. Calzoletti, R. A. Cameron, M. Capalbi, P. A. Caraveo, D. Carosati, J. M. Casandjian, E. Cavazzuti, C. Cecchi, Ö. Çelik, E. Charles, S. Chaty, A. Chekhtman, W. P. Chen, J. Chiang, G. Chincarini, S. Ciprini, R. Claus, J. Cohen-Tanugi, S. Colafrancesco, L. R. Cominsky, J. Conrad, L. Costamante, S. Cutini, F. D’ammendo, R. Deitrick, V. D’Elia, C. D. Dermer, A. de Angelis, F. de Palma, S. W. Digel, I. Donnarumma, E. d. C. e. Silva, P. S. Drell, R. Dubois, D. Dultzin, D. Dumora, A. Falcone, C. Farnier, C. Favuzzi, S. J. Fegan, W. B. Focke, E. Forné, P. Fortin, M. Frailis, L. Fuhrmann, Y. Fukazawa, S. Funk, P. Fusco, J. L. Gómez, F. Gargano, D. Gasparri, N. Gehrels, S. Germani, B. Giebels, N. Giglietto, P. Giommi, F. Giordano, A. Giuliani, T. Glanzman, G. Godfrey, I. A. Grenier, C. Gronwall, J. E. Grove, L. Guillemot, S. Guiriec, M. A. Gurwell, D. Hadasch, Y. Hanabata, A. K. Harding, M. Hayashida, E. Hays, S. E. Healey, J. Heidt, D. Hiriart, D. Horan, E. A. Hoversten, R. E. Hughes, R. Itoh, M. S. Jackson, G. Jóhannesson, A. S. Johnson, W. N. Johnson, S. G. Jorstad, M. Kadler, T. Kamae, H. Katagiri, J. Kataoka, N. Kawai, J. Kennea, M. Kerr, G. Kimeridze, J. Knödseder, M. L. Kocian, E. N. Kopatskaya, E. Koptelova, T. S. Konstantinova, Y. Y. Kovalev, Y. A. Kovalev, O. M. Kurtanidze, M. Kuss, J. Lande, V. M. Larionov, L. Latronico, P. Leto, E. Lindfors, F. Longo, F. Loparco, B. Lott, M. N. Lovellette, P. Lubrano, G. M. Madejski, A. Makeev, P. Marchegiani, A. P. Marscher, F. Marshall, W. Max-Moerbeck, M. N. Mazziotta, W. McConville, J. E. McEnery, C. Meurer, P. F. Michelson, W. Mitthumsiri, T. Mizuno, A. A. Moiseev, C. Monte, M. E. Monzani, A. Morselli, I. V. Moskalenko, S. Murgia, I. Nestoras, K. Nilsson, N. A. Nizhelsky, P. L. Nolan, J. P. Norris, E. Nuss, T. Ohsugi, R. Ojha, N. Omodei, E. Orlando, J. F. Ormes, J. Osborne, M. Ozaki, L. Pacciani, P. Padovani, C. Pagani, K. Page, D. Paneque, J. H. Panetta, D. Parent, M. Pasanen, V. Pavlidou, V. Pelassa, M. Pepe, M. Perri, M. Pesce-Rollins, S. Piranomonte, F. Piron, C. Pittori, T. A. Porter, S. Puccetti, F. Rahoui, S. Rainò, C. Raiteri, R. Rando, M. Razzano, A. Reimer, O. Reimer, T. Reposeur, J. L. Richards, S. Ritz, L. S. Rochester, A. Y. Rodriguez, R. W. Romani, J. A. Ros, M. Roth, P. Roustazadeh, F. Ryde, H. F. W. Sadrozinski, A. Sadun, D. Sanchez, A. Sander, P. M. Saz Parkinson, J. D. Scargle, A. Sellerholm, C. Sgrò, M. S. Shaw, L. A. Sigua, E. J. Siskind, D. A. Smith, P. D. Smith, G. Spandre, P. Spinelli, J. L. Starck, M. Stevenson, G. Stratta, M. S. Strickman, D. J. Suson, H. Tajima, H. Takahashi, T. Takahashi, L. O. Takalo, T. Tanaka, J. B. Thayer, J. G. Thayer, D. J. Thompson, L. Tibaldo, D. F. Torres, G. Tosti, A. Tramacere, Y. Uchiyama, T. L. Usher, V. Vasileiou,

- F. Verrecchia, N. Vilchez, M. Villata, V. Vitale, A. P. Waite, P. Wang, B. L. Winer, K. S. Wood, T. Ylinen, J. A. Zensus, G. V. Zhekanis, and M. Ziegler. The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars. *ApJ*, 716(1):30–70, June 2010b. doi: 10.1088/0004-637X/716/1/30.
- S. Abdollahi, F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello, W. B. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, J. Becerra Gonzalez, R. Bellazzini, A. Berretta, E. Bissaldi, R. D. Blandford, E. D. Bloom, R. Bonino, E. Bottacini, T. J. Brandt, J. Bregeon, P. Bruel, R. Buehler, T. H. Burnett, S. Buson, R. A. Cameron, R. Caputo, P. A. Caraveo, J. M. Casandjian, D. Castro, E. Cavazzuti, E. Charles, S. Chaty, S. Chen, C. C. Cheung, G. Chiaro, S. Ciprini, J. Cohen-Tanugi, L. R. Cominsky, J. Coronado-Blázquez, D. Costantin, A. Cuoco, S. Cutini, F. D’Ammando, M. DeKlotz, P. de la Torre Luque, F. de Palma, A. Desai, S. W. Digel, N. Di Lalla, M. Di Mauro, L. Di Venere, A. Domínguez, D. Dumora, F. Fana Dirirsa, S. J. Fegan, E. C. Ferrara, A. Franckowiak, Y. Fukazawa, S. Funk, P. Fusco, F. Gargano, D. Gasparri, N. Giglietto, P. Giommi, F. Giordano, M. Giroletti, T. Glanzman, D. Green, I. A. Grenier, S. Griffin, M. H. Grondin, J. E. Grove, S. Guiriec, A. K. Harding, K. Hayashi, E. Hays, J. W. Hewitt, D. Horan, G. Jóhannesson, T. J. Johnson, T. Kamae, M. Kerr, D. Kocevski, M. Kovac’evic’, M. Kuss, D. Landriau, S. Larsson, L. Latronico, M. Lemoine-Goumard, J. Li, I. Liodakis, F. Longo, F. Loparco, B. Lott, M. N. Lovellette, P. Lubrano, G. M. Madejski, S. Maldera, D. Malyshev, A. Manfreda, E. J. Marchesini, L. Marcotulli, G. Martí-Devesa, P. Martin, F. Massaro, M. N. Mazziotta, J. E. McEnery, I. Mereu, M. Meyer, P. F. Michelson, N. Mirabal, T. Mizuno, M. E. Monzani, A. Morselli, I. V. Moskalenko, M. Negro, E. Nuss, R. Ojha, N. Omodei, M. Orienti, E. Orlando, J. F. Ormes, M. Palatiello, V. S. Paliya, D. Paneque, Z. Pei, H. Peña-Herazo, J. S. Perkins, M. Persic, M. Pesce-Rollins, V. Petrosian, L. Petrov, F. Piron, H. Poon, T. A. Porter, G. Principe, S. Rainò, R. Rando, M. Razzano, S. Razzaque, A. Reimer, O. Reimer, Q. Remy, T. Reposeur, R. W. Romani, P. M. Saz Parkinson, F. K. Schinzel, D. Serini, C. Sgrò, E. J. Siskind, D. A. Smith, G. Spandre, P. Spinelli, A. W. Strong, D. J. Suson, H. Tajima, M. N. Takahashi, D. Tak, J. B. Thayer, D. J. Thompson, L. Tibaldo, D. F. Torres, E. Torresi, J. Valverde, B. Van Klaveren, P. van Zyl, K. Wood, M. Yassine, and G. Zaharijas. Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *ApJS*, 247(1): 33, Mar. 2020. doi: 10.3847/1538-4365/ab6bcb.
- V. A. Acciari, E. Aliu, T. Aune, M. Beilicke, W. Benbow, M. Böttcher, D. Boltuch, J. H. Buckley, S. M. Bradbury, V. Bugaev, K. Byrum, A. Cannon, A. Cesarini, L. Ciupik, P. Cogan, W. Cui, R. Dickherber, C. Duke, A. Falcone, J. P. Finley, P. Fortin, L. Fortson, A. Furniss, N. Galante, D. Gall, K. Gibbs, G. H. Gillanders, J. Grube, R. Guenette, G. Gyuk, D. Hanna, J. Holder, C. M. Hui, T. B. Humensky, P. Kaaret, N. Karlsson, M. Kertzman, D. Kieda, A. Konopelko, H. Krawczynski, F. Krennrich, M. J. Lang, S. Le Bohec, G. Maier, S. McArthur, A. McCann, M. McCutcheon, J. Millis, P. Moriarty, R. A. Ong, A. N. Otte, D. Pandel, J. S. Perkins, A. Pichel, M. Pohl, J. Quinn, K. Ragan, L. C. Reyes, P. T. Reynolds, E. Roache, H. J. Rose, G. H. Sembroski, A. W. Smith, D. Steele, M. Theiling, S. Thibadeau,

- A. Varlotta, V. V. Vassiliev, S. Vincent, S. P. Wakely, J. E. Ward, T. C. Weekes, A. Weinstein, T. Weisgarber, D. A. Williams, S. Wissel, M. Wood, E. Pian, S. Verzellone, I. Donnarumma, F. D'Ammando, A. Bulgarelli, A. W. Chen, A. Giuliani, F. Longo, L. Pacciani, G. Pucella, V. Vittorini, M. Tavani, A. Argan, G. Barbiellini, P. Caraveo, P. W. Cattaneo, V. Cocco, E. Costa, E. Del Monte, G. De Paris, G. Di Cocco, Y. Evangelista, M. Feroci, M. Fiorini, T. Froyland, M. Frutti, F. Fuschino, M. Galli, F. Gianotti, C. Labanti, I. Lapshov, F. Lazzarotto, P. Lipari, M. Marisaldi, M. Mastropietro, S. Mereghetti, E. Morelli, A. Morselli, A. Pellizzoni, F. Perotti, G. Piano, P. Picozza, M. Pilia, G. Porrovecchio, M. Prest, M. Rapisarda, A. Rappoldi, A. Rubini, S. Sabatini, P. Soffitta, M. Trifoglio, A. Trois, E. Vallazza, A. Zambra, D. Zanello, C. Pittori, P. Santolamazza, F. Verrecchia, P. Giommi, S. Colafrancesco, L. Salotti, M. Villata, C. M. Raiteri, H. D. Aller, M. F. Aller, A. A. Arkharov, N. V. Efimova, V. M. Larionov, P. Leto, R. Ligustri, E. Lindfors, M. Pasanen, O. M. Kurtanidze, S. D. Tetradsze, A. Lahteenmaki, M. Kotiranta, A. Cucchiara, P. Romano, R. Nesci, T. Pursimo, J. Heidt, E. Benitez, D. Hiriart, K. Nilsson, A. Berdyugin, R. Mujica, D. Dultzin, J. M. Lopez, M. Mommert, M. Sorcia, and I. de la Calle Perez. Multiwavelength Observations of a TeV-Flare from W Comae. *ApJ*, 707(1):612–620, Dec. 2009. doi: 10.1088/0004-637X/707/1/612.
- A. Agarwal and A. C. Gupta. Multiband optical variability studies of BL Lacertae. *MNRAS*, 450(1):541–551, June 2015. doi: 10.1093/mnras/stv625.
- A. Agarwal, A. C. Gupta, R. Bachev, A. Strigachev, E. Semkov, P. J. Wiita, J. H. Fan, U. S. Pandey, S. Boeva, and B. Spassov. Multiband optical variability of the blazar S5 0716+714 in outburst state during 2014-2015. *MNRAS*, 455(1):680–690, Jan. 2016. doi: 10.1093/mnras/stv2345.
- A. Agarwal, S. A. Cellone, I. Andruchow, L. Mammana, M. Singh, G. C. Anupama, B. Mihov, A. Raj, L. Slavcheva-Mihova, A. Özdönmez, and E. Ege. Multiband optical variability of 3C 279 on diverse time-scales. *MNRAS*, 488(3):4093–4105, Sept. 2019. doi: 10.1093/mnras/stz1981.
- I. Agudo, A. P. Marscher, S. G. Jorstad, J. L. Gómez, M. Perucho, B. G. Piner, M. Rioja, and R. Dodson. Erratic Jet Wobbling in the BL Lacertae Object OJ287 Revealed by Sixteen Years of 7 mm VLBA Observations. *ApJ*, 747(1):63, Mar. 2012. doi: 10.1088/0004-637X/747/1/63.
- J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, P. Antoranz, A. Armada, C. Baixeras, J. A. Barrio, H. Bartko, D. Bastieri, J. K. Becker, W. Bednarek, K. Berger, C. Bigongiari, A. Biland, R. K. Bock, P. Bordas, V. Bosch-Ramon, T. Bretz, I. Britvitch, M. Camara, E. Carmona, A. Chilingarian, J. A. Coarasa, S. Commichau, J. L. Contreras, J. Cortina, M. T. Costado, V. Curtef, V. Danielyan, F. Dazzi, A. De Angelis, C. Delgado, R. de los Reyes, B. De Lotto, E. Domingo-Santamaría, D. Dorner, M. Doro, M. Errando, M. Fagiolini, D. Ferenc, E. Fernández, R. Firpo, J. Flix, M. V. Fonseca, L. Font, M. Fuchs, N. Galante, R. J. García-López, M. Garczarczyk, M. Gaug, M. Giller, F. Goebel, D. Hakobyan, M. Hayashida, T. Hengstebeck, A. Herrero, D. Höhne, J. Hose, D. Hrupec, C. C. Hsu, P. Jacon, T. Jogler,

- R. Kosyra, D. Kranich, R. Kritzer, A. Laille, E. Lindfors, S. Lombardi, F. Longo, J. López, M. López, E. Lorenz, P. Majumdar, G. Maneva, K. Mannheim, O. Mansutti, M. Mariotti, M. Martínez, D. Mazin, C. Merck, M. Meucci, M. Meyer, J. M. Miranda, R. Mirzoyan, S. Mizobuchi, A. Moralejo, D. Nieto, K. Nilsson, J. Nin-kovic, E. Oña-Wilhelmi, N. Otte, I. Oya, D. Paneque, M. Panniello, R. Paoletti, J. M. Paredes, M. Pasanen, D. Pascoli, F. Pauss, R. Pegna, M. Persic, L. Peruzzo, A. Piccioli, E. Prandini, N. Puchades, A. Raymers, W. Rhode, M. Ribó, J. Rico, M. Rissi, A. Robert, S. Rügamer, A. Saggion, T. Saito, A. Sánchez, P. Sartori, V. Scalzotto, V. Scapin, R. Schmitt, T. Schweizer, M. Shayduk, K. Shinozaki, S. N. Shore, N. Sidro, A. Sillanpää, D. Sobczynska, A. Stamerra, L. S. Stark, L. Takalo, F. Tavecchio, P. Temnikov, D. Tescaro, M. Teshima, D. F. Torres, N. Turini, H. Vankov, V. Vitale, R. M. Wagner, T. Wibig, W. Wittek, F. Zandanel, R. Zanin, and J. Zapatero. Variable Very High Energy γ -Ray Emission from Markarian 501. *ApJ*, 669(2):862–883, Nov. 2007. doi: 10.1086/521382.
- J. R. P. Angel and H. S. Stockman. Optical and infrared polarization of active extragalactic objects. *ARA&A*, 18:321–361, Jan. 1980. doi: 10.1146/annurev.aa.18.090180.001541.
- R. Antonucci. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *ARA&A*, 31:473–521, Jan. 1993. doi: 10.1146/annurev.aa.31.090193.002353.
- J. M. Attridge, J. F. C. Wardle, and D. C. Homan. Concurrent 43 and 86 GHz Very Long Baseline Polarimetry of 3C 273. *ApJ*, 633(2):L85–L88, Nov. 2005. doi: 10.1086/498392.
- M. K. Babadzhanyants and E. T. Belokon'. Optical monitoring of the BL Lac object ON 231 in 1972–1990. *Astronomy Reports*, 46(8):609–625, Aug. 2002. doi: 10.1134/1.1502221.
- R. Bachev. Violent intranight optical variability of the blazar S4 0954+65 during its unprecedented 2015 February outburst. *MNRAS*, 451:L21–L24, July 2015. doi: 10.1093/mnrasl/slv059.
- A. Bauer, C. Baltay, P. Coppi, C. Donalek, A. Drake, S. G. Djorgovski, N. Ellman, E. Glikman, M. Graham, J. Jerke, A. Mahabal, D. Rabinowitz, R. Scalzo, and R. Williams. Highly Variable Objects in the Palomar-QUEST Survey: A Blazar Search Using Optical Variability. *ApJ*, 705(1):46–53, Nov. 2009. doi: 10.1088/0004-637X/705/1/46.
- P. P. B. Beaklini, T. P. Dominici, and Z. Abraham. Multiwavelength flaring activity of PKS 1510-089. *A&A*, 606:A87, Oct. 2017. doi: 10.1051/0004-6361/201731118.
- J. Becerra González, J. A. Acosta-Pulido, W. Boschin, R. Clavero, J. Otero-Santos, J. A. Carballo-Bello, and L. Domínguez-Palmero. Optical spectral characterization of the gamma-ray blazars S4 0954+65, TXS 1515-273, and RX J0812.0+0237. *MNRAS*, 504(4):5258–5269, July 2021. doi: 10.1093/mnras/stab1274.

- E. T. Belokon, M. K. Babadzhanyants, and J. T. Pollock. ON 231: the testing of 3.8-year period for optical outbursts with multi-peak structure. *A&A*, 356:L21–L24, Apr. 2000.
- E. Benítez and A. Ramírez. Optical Variability of BL Lac: is it Redder-when-fainter? In H. R. Miller, K. Marshall, J. R. Webb, and M. F. Aller, editors, *Blazar Variability Workshop II: Entering the GLAST Era*, volume 350 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 71, July 2006.
- E. Benítez. *Estudio de variabilidad en núcleos activos de galaxias*. Tesis de Doctorado, 1997.
- M. S. Bessell. UBVRI passbands. *PASP*, 102:1181–1199, Oct. 1990. doi: 10.1086/132749.
- M. S. Bessell, F. Castelli, and B. Plez. Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O - M stars. *A&A*, 333:231–250, May 1998.
- G. Bhatta. Characterizing Long-term Optical Variability Properties of γ -Ray-bright Blazars. *ApJ*, 923(1):7, Dec. 2021. doi: 10.3847/1538-4357/ac2819.
- J. Binney and M. Merrifield. *Galactic Astronomy*. Princeton University Press, 1998.
- M. Boettcher, D. E. Harris, and H. Krawczynski. *Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei*. WILEY-VCH, 2012.
- E. Bonning, C. M. Urry, C. Bailyn, M. Buxton, R. Chatterjee, P. Coppi, G. Fossati, J. Isler, and L. Maraschi. SMARTS Optical and Infrared Monitoring of 12 Gamma-Ray Bright Blazars. *ApJ*, 756(1):13, Sept. 2012. doi: 10.1088/0004-637X/756/1/13.
- S. Britzen, C. Fendt, G. Witzel, S. J. Qian, I. N. Pashchenko, O. Kurtanidze, M. Zajączek, G. Martinez, V. Karas, M. Aller, H. Aller, A. Eckart, K. Nilsson, P. Arévalo, J. Cuadra, M. Subroweit, and A. Witzel. OJ287: deciphering the ‘Rosetta stone of blazars. *MNRAS*, 478(3):3199–3219, Aug. 2018. doi: 10.1093/mnras/sty1026.
- I. W. A. Browne. Two Bright New Quasi-stellar Radio Sources. *Nature*, 231(5304):515–516, June 1971. doi: 10.1038/231515a0.
- G. R. Burbidge, T. W. Jones, and S. L. O’Dell. Physics of compact nonthermal sources. III. Energetic considerations. *ApJ*, 193:43–54, Oct. 1974. doi: 10.1086/153125.
- G. Castignani, E. Pian, T. M. Belloni, F. D’Ammando, L. Foschini, G. Ghisellini, T. Pursimo, A. Bazzano, V. Beckmann, V. Bianchin, M. T. Fiocchi, D. Impiombato, C. M. Raiteri, S. Soldi, G. Tagliaferri, A. Treves, and M. Türler. Multiwavelength variability study and search for periodicity of PKS 1510-089. *A&A*, 601:A30, May 2017. doi: 10.1051/0004-6361/201629775.

- S. D. Clements and M. T. Carini. Multiband Microvariability Observations of BL Lacertae during the Outburst of 1997. *AJ*, 121(1):90–96, Jan. 2001. doi: 10.1086/318037.
- L. Costamante. AGNs in the VHE gamma-ray era: a review. *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 83:138, Jan. 2012.
- T. J. L. Courvoisier. The bright quasar 3C 273. *A&A Rev.*, 9(1-2):1–32, Jan. 1998. doi: 10.1007/s001590050013.
- T. J. L. Courvoisier, V. Beckmann, G. Bourban, J. Chenevez, M. Chernyakova, S. Demailly, P. Favre, J. E. Grindlay, N. Lund, P. O’Brien, K. Page, N. Produit, M. Türler, M. J. L. Turner, R. Staubert, M. Stuhlinger, R. Walter, and A. A. Zdziarski. Simultaneous observations of the quasar 3C 273 with INTEGRAL and RXTE. *A&A*, 411:L343–L348, Nov. 2003. doi: 10.1051/0004-6361:20031206.
- B. Z. Dai, X. H. Li, Z. M. Liu, B. K. Zhang, W. W. Na, Y. F. Wu, J. M. Hao, Y. Xiang, Z. J. Jiang, and L. Zhang. The long-term multiband optical observations and colour index for the quasar 3C 273. *MNRAS*, 392(3):1181–1192, Jan. 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.14137.x.
- Y. Dai, J. Wu, Z.-H. Zhu, X. Zhou, and J. Ma. Color Behavior of BL Lacertae Object OJ 287 during an Optical Outburst. *AJ*, 141(2):65, Feb. 2011. doi: 10.1088/0004-6256/141/2/65.
- L. Dey, M. J. Valtonen, A. Gopakumar, S. Zola, R. Hudec, P. Pihajoki, S. Cipriani, K. Matsumoto, K. Sadakane, M. Kidger, K. Nilsson, S. Mikkola, A. Sillanpää, L. O. Takalo, H. J. Lehto, A. Berdyugin, V. Piirola, H. Jermak, K. S. Baliyan, T. Pursimo, D. B. Caton, F. Alicavus, A. Baransky, P. Blay, P. Boumis, D. Boyd, M. Campas Torrent, F. Campos, J. Carrillo Gómez, S. Chandra, V. Chavushyan, J. Dalessio, B. Debski, M. Drozd, H. Er, A. Erdem, A. Escartin Pérez, V. Fallah Ramazani, A. V. Filippenko, E. Gafton, S. Ganesh, F. Garcia, K. Gazeas, V. Godunova, F. Gómez Pinilla, M. Gopinathan, J. B. Haislip, J. Harmanen, G. Hurst, J. Janík, M. Jelinek, A. Joshi, M. Kagitani, R. Karjalainen, N. Kaur, W. C. Keel, V. V. Kouprianov, T. Kundera, S. Kurowski, A. Kvammen, A. P. LaCluyze, B. C. Lee, A. Liakos, E. Lindfors, J. Lozano de Haro, M. Mugrauer, R. Naves Noguees, A. W. Neely, R. H. Nelson, W. Ogloza, S. Okano, U. Pajdosz-Śmierciak, J. C. Pandey, M. Perri, G. Poyner, J. Provencal, A. Raj, D. E. Reichart, R. Reinthal, T. Reynolds, J. Saario, S. Sadegi, T. Sakanoi, J. L. Salto González, Sameer, T. Schweyer, A. Simon, M. Siwak, F. C. Soldán Alfaro, E. Sonbas, I. Steele, J. T. Stocke, J. Strobl, T. Tomov, L. Tremosa Espasa, J. R. Valdes, J. Valero Pérez, F. Verrecchia, V. Vasylenko, J. R. Webb, M. Yoneda, M. Zejmo, W. Zheng, and P. Zielinski. Authenticating the Presence of a Relativistic Massive Black Hole Binary in OJ 287 Using Its General Relativity Centenary Flare: Improved Orbital Parameters. *ApJ*, 866(1):11, Oct. 2018. doi: 10.3847/1538-4357/aadd95.

- L. Dey, M. J. Valtonen, A. Gopakumar, R. Lico, J. L. Gómez, A. Susobhanan, S. Kossasa, and P. Pihajoki. Explaining temporal variations in the jet PA of the blazar OJ 287 using its BBH central engine model. *MNRAS*, 503(3):4400–4412, May 2021. doi: 10.1093/mnras/stab730.
- O. Dreissigacker and M. Camenzind. A Lighthouse Model for Blazar Jets-Variability and Spectrum. In H. R. Miller, J. R. Webb, and J. C. Noble, editors, *Blazar Continuum Variability*, volume 110 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 377, Jan. 1996.
- D. O. Edge, J. R. Shakeshaft, W. B. McAdam, J. E. Baldwin, and S. Archer. A survey of radio sources at a frequency of 159 Mc/s. *MmRAS*, 68:37–60, Jan. 1959.
- J. H. Fan, Q. S. Peng, J. Tao, B. C. Qian, and Z. Q. Shen. Optical Observations of 3C 273 From 2000 to 2008. *AJ*, 138(5):1428–1434, Nov. 2009. doi: 10.1088/0004-6256/138/5/1428.
- J. H. Fan, O. Kurtanidze, Y. Liu, G. M. Richter, R. Chanishvili, and Y. H. Yuan. Optical Monitoring of Two Brightest Nearby Quasars, PHL 1811 and 3C 273. *ApJS*, 213(2):26, Aug. 2014. doi: 10.1088/0067-0049/213/2/26.
- Z.-H. Fan and X. Cao. Black Hole Masses and Doppler Factors of Gamma-Ray Active Galactic Nuclei. *ApJ*, 602(1):103–110, Feb. 2004. doi: 10.1086/380902.
- B. L. Fanaroff and J. M. Riley. The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity. *MNRAS*, 167:31P–36P, May 1974. doi: 10.1093/mnras/167.1.31P.
- H.-C. Feng, H. T. Liu, X. L. Fan, Y. Zhao, J. M. Bai, F. Wang, D. R. Xiong, and S. K. Li. Search for Intra-day Optical Variability in Mrk 501. *ApJ*, 849(2):161, Nov. 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa9123.
- L. Foschini, G. Ghisellini, F. Tavecchio, G. Bonnoli, and A. Stamerra. Search for the shortest variability at gamma rays in flat-spectrum radio quasars. *A&A*, 530:A77, June 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201117064.
- J.-P. Fu, H.-J. Zhang, X. Zhang, D.-R. Xiong, and F. Guo. The Periodicity Analysis of Radio Flux Variability of PKS 1510-089 with the Period04 Method. *Chinese Astron. Astrophys.*, 38(4):367–374, Oct. 2014. doi: 10.1016/j.chinastron.2014.10.004.
- H. Gaur, A. C. Gupta, A. Strigachev, R. Bachev, E. Semkov, P. J. Wiita, S. Peneva, S. Boeva, N. Kacharov, B. Mihov, and E. Ovcharov. Quasi-simultaneous two-band optical variability of the blazars 1ES 1959+650 and 1ES 2344+514. *MNRAS*, 420(4):3147–3162, Mar. 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20243.x.
- H. Gaur, A. C. Gupta, P. J. Wiita, M. Uemura, R. Itoh, and M. Sasada. Anti-correlated Optical Flux and Polarization Variability in BL Lac. *ApJ*, 781(1):L4, Jan. 2014. doi: 10.1088/2041-8205/781/1/L4.

- H. Gaur, A. C. Gupta, R. Bachev, A. Strigachev, E. Semkov, P. J. Wiita, O. M. Kurtanidze, A. Darriba, G. Damjanovic, R. G. Chanishvili, S. Ibryamov, S. O. Kurtanidze, M. G. Nikolashvili, L. A. Sigua, and O. Vince. Optical variability of TeV blazars on long time-scales. *MNRAS*, 484(4):5633–5644, Apr. 2019. doi: 10.1093/mnras/stz322.
- A. C. Gupta, A. Agarwal, A. Mishra, H. Gaur, P. J. Wiita, M. F. Gu, O. M. Kurtanidze, G. Damjanovic, M. Uemura, E. Semkov, A. Strigachev, R. Bachev, O. Vince, Z. Zhang, B. Villarroel, P. Kushwaha, A. Pandey, T. Abe, R. Chanishvili, R. A. Chigladze, J. H. Fan, J. Hirochi, R. Itoh, Y. Kanda, M. Kawabata, G. N. Kimeridze, S. O. Kurtanidze, G. Latev, R. V. M. Dimitrova, T. Nakaoka, M. G. Nikolashvili, K. Shiki, L. A. Sigua, and B. Spassov. Multiband optical variability of the blazar OJ 287 during its outbursts in 2015-2016. *MNRAS*, 465(4):4423–4433, Mar. 2017. doi: 10.1093/mnras/stw3045.
- A. C. Gupta, H. Gaur, P. J. Wiita, A. Pandey, P. Kushwaha, S. M. Hu, O. M. Kurtanidze, E. Semkov, G. Damjanovic, A. Goyal, M. Uemura, A. Darriba, X. Chen, O. Vince, M. F. Gu, Z. Zhang, R. Bachev, R. Chanishvili, R. Itoh, M. Kawabata, S. O. Kurtanidze, T. Nakaoka, M. G. Nikolashvili, Ł. Stawarz, and A. Strigachev. Characterizing Optical Variability of OJ 287 in 2016-2017. *AJ*, 157(3):95, Mar. 2019. doi: 10.3847/1538-3881/aafe7d.
- R. C. Hartman, D. L. Bertsch, C. E. Fichtel, S. D. Hunter, G. Kanbach, D. A. Kniffen, P. W. Kwok, Y. C. Lin, J. R. Mattox, H. A. Mayer-Hasselwander, P. F. Michelson, C. von Montigny, H. I. Nel, P. L. Nolan, K. Pinkau, H. Rothermel, E. Schneid, M. Sommer, P. Sreekumar, and D. J. Thompson. Detection of High-Energy Gamma Radiation from Quasar 3C 279 by the EGRET Telescope on the Compton Gamma Ray Observatory. *ApJ*, 385:L1, Jan. 1992. doi: 10.1086/186263.
- C. Hazard, M. B. Mackey, and A. J. Shimmins. Investigation of the Radio Source 3C 273 By The Method of Lunar Occultations. *Nature*, 197(4872):1037–1039, Mar. 1963. doi: 10.1038/1971037a0.
- J. Heidt and S. J. Wagner. Statistics of optical intraday variability in a complete sample of radio-selected BL Lacertae objects. *A&A*, 305:42, Jan. 1996.
- S. M. Hu, G. Zhao, H. Y. Guo, X. Zhang, and Y. G. Zheng. The optical spectral slope variability of 17 blazars. *MNRAS*, 371(3):1243–1250, Sept. 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10721.x.
- B. Iriarte and E. Chavira. Estrellas azules en el casquete galactico norte. *Boletín de los observatorios de Tonantzintla y Tacubaya*, 2(16):3–36, June 1957.
- J. C. Isler, C. M. Urry, P. Coppi, C. Bailyn, M. Brady, E. MacPherson, M. Buxton, and I. Hasan. A Consolidated Framework of the Color Variability in Blazars: Long-term Optical/Near-infrared Observations of 3C 279. *ApJ*, 844(2):107, Aug. 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa79fc.

- S. G. Jorstad, A. P. Marscher, J. R. Mattox, A. E. Wehrle, S. D. Bloom, and A. V. Yurchenko. Multiepoch Very Long Baseline Array Observations of EGRET-detected Quasars and BL Lacertae Objects: Superluminal Motion of Gamma-Ray Bright Blazars. *ApJS*, 134(2):181–240, June 2001. doi: 10.1086/320858.
- S. G. Jorstad, A. P. Marscher, D. A. Morozova, I. S. Troitsky, I. Agudo, C. Casadio, A. Foord, J. L. Gómez, N. R. MacDonald, S. N. Molina, A. Lähteenmäki, J. Tammi, and M. Tornikoski. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz within the VLBA-BU-BLAZAR Program. *ApJ*, 846(2):98, Sept. 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa8407.
- J. Juryšek, V. Sliusar, D. Moulin, and R. Walter. Observational constraints on the blazar jet wobbling timescales. In *37th International Cosmic Ray Conference. 12-23 July 2021. Berlin*, page 643, Mar. 2022.
- N. Kalita, A. C. Gupta, and M. Gu. Optical Variability of a Newly Discovered Blazar Sample from the BZCAT Catalog. *ApJS*, 257(2):41, Dec. 2021. doi: 10.3847/1538-4365/ac1e9c.
- H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, and K. J. Donner. *Fundamental Astronomy*. Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-53045-0.
- K. I. Kellermann, R. Sramek, M. Schmidt, D. B. Shaffer, and R. Green. VLA Observations of Objects in the Palomar Bright Quasar Survey. *AJ*, 98:1195, Oct. 1989. doi: 10.1086/115207.
- J.-Y. Kim, T. P. Krichbaum, A. E. Broderick, M. Wielgus, L. Blackburn, J. L. Gómez, M. D. Johnson, K. L. Bouman, A. Chael, K. Akiyama, S. Jorstad, A. P. Marscher, S. Issaoun, M. Janssen, C.-k. Chan, T. Savolainen, D. W. Pesce, F. Özel, A. Alberdi, W. Alef, K. Asada, R. Azulay, A.-K. Baczko, D. Ball, M. Baloković, J. Barrett, D. Bintley, W. Boland, G. C. Bower, M. Bremer, C. D. Brinkerink, R. Brissenden, S. Britzen, D. Brogiere, T. Bronzwaer, D.-Y. Byun, J. E. Carlstrom, S. Chatterjee, K. Chatterjee, M.-T. Chen, Y. Chen, I. Cho, P. Christian, J. E. Conway, J. M. Cordes, G. B. Crew, Y. Cui, J. Davelaar, M. De Laurentis, R. Deane, J. Dempsey, G. Desvignes, J. Dexter, S. S. Doeleman, R. P. Eatough, H. Falcke, V. L. Fish, E. Fomalont, R. Fraga-Encinas, P. Friberg, C. M. Fromm, P. Galison, C. F. Gammie, R. García, O. Gentaz, B. Georgiev, C. Goddi, R. Gold, A. I. Gómez-Ruiz, M. Gu, M. Gurwell, K. Hada, M. H. Hecht, R. Hesper, L. C. Ho, P. Ho, M. Honma, C.-W. L. Huang, L. Huang, D. H. Hughes, S. Ikeda, M. Inoue, D. J. James, B. T. Jannuzi, B. Jeter, W. Jiang, A. Jimenez-Rosales, T. Jung, M. Karami, R. Karuppusamy, T. Kawashima, G. K. Keating, M. Kettenis, J. Kim, J. Kim, M. Kino, J. Y. Koay, P. M. Koch, S. Koyama, M. Kramer, C. Kramer, C.-Y. Kuo, T. R. Lauer, S.-S. Lee, Y.-R. Li, Z. Li, M. Lindqvist, R. Lico, K. Liu, E. Liuzzo, W.-P. Lo, A. P. Lobanov, L. Loinard, C. Lonsdale, R.-S. Lu, N. R. MacDonald, J. Mao, S. Markoff, D. P. Marrone, I. Martí-Vidal, S. Matsushita, L. D. Matthews, L. Medeiros, K. M. Menten, Y. Mizuno, I. Mizuno, J. M. Moran, K. Moriyama, M. Moscibrodzka, G. Musoke, C. Müller, H. Nagai, N. M. Nagar, M. Nakamura,

- R. Narayan, G. Narayanan, I. Natarajan, R. Neri, C. Ni, A. Noutsos, H. Okino, H. Olivares, G. N. Ortiz-León, T. Oyama, D. C. M. Palumbo, J. Park, N. Patel, U.-L. Pen, V. Piétu, R. Plambeck, A. PopStefanija, O. Porth, B. Prather, J. A. Preciado-López, D. Psaltis, H.-Y. Pu, V. Ramakrishnan, R. Rao, M. G. Rawlings, A. W. Raymond, L. Rezzolla, B. Ripperda, F. Roelofs, A. Rogers, E. Ros, M. Rose, A. Roshanineshat, H. Rottmann, A. L. Roy, C. Ruzczyk, B. R. Ryan, K. L. J. Rygl, S. Sánchez, D. Sánchez-Arguelles, M. Sasada, F. P. Schloerb, K.-F. Schuster, L. Shao, Z. Shen, D. Small, B. W. Sohn, J. SooHoo, F. Tazaki, P. Tiede, R. P. J. Tilanus, M. Titus, K. Toma, P. Torne, T. Trent, E. Traianou, S. Trippe, S. Tsuda, I. van Bemmell, H. J. van Langevelde, D. R. van Rossum, J. Wagner, J. Wardle, D. Ward-Thompson, J. Weintraub, N. Wex, R. Wharton, G. N. Wong, Q. Wu, D. Yoon, A. Young, K. Young, Z. Younsi, F. Yuan, Y.-F. Yuan, J. A. Zensus, G. Zhao, S.-S. Zhao, Z. Zhu, J.-C. Algaba, A. Allardi, R. Amestica, J. Anzarski, U. Bach, F. K. Baganoff, C. Beaudoin, B. A. Benson, R. Berthold, J. M. Blanchard, R. Blundell, S. Bustamente, R. Cappallo, E. Castillo-Domínguez, C.-C. Chang, S.-H. Chang, S.-C. Chang, C.-C. Chen, R. Chilson, T. C. Chuter, R. C. Rosado, I. M. Coulson, J. Crowley, M. Derome, M. Dexter, S. Dornbusch, K. A. Dudevoir, S. A. Dzib, A. Eckart, C. Eckert, N. R. Erickson, W. B. Everett, A. Faber, J. R. Farah, V. Fath, T. W. Folkers, D. C. Forbes, R. Freund, D. M. Gale, F. Gao, G. Geertsema, D. A. Graham, C. H. Greer, R. Grosslein, F. Gueth, D. Haggard, N. W. Halverson, C.-C. Han, K.-C. Han, J. Hao, Y. Hasegawa, J. W. Henning, A. Hernández-Gómez, R. Herrero-Illana, S. Heyminck, A. Hirota, J. Hoge, Y.-D. Huang, C. M. Violette Impellizzeri, H. Jiang, D. John, A. Kamble, R. Keisler, K. Kimura, Y. Kono, D. Kubo, J. Kuroda, R. Lacasse, R. A. Laing, E. M. Leitch, C.-T. Li, L. C. C. Lin, C.-T. Liu, K.-Y. Liu, L.-M. Lu, R. G. Marson, P. L. Martin-Cocher, K. D. Masingill, C. Matulonis, M. P. McColl, S. R. McWhirter, H. Messias, Z. Meyer-Zhao, D. Michalik, A. Montaña, W. Montgomerie, M. Mora-Klein, D. Muders, A. Nadolski, S. Navarro, J. Neilsen, C. H. Nguyen, H. Nishioka, T. Norton, M. A. Nowak, G. Nystrom, H. Ogawa, P. Oshiro, T. Oyama, H. Parsons, J. Peñalver, N. M. Phillips, M. Poirier, N. Pradel, R. A. Primiani, P. A. Raffin, A. S. Rahlin, G. Reiland, C. Risacher, I. Ruiz, A. F. Sáez-Madaín, R. Sassella, P. Schellart, P. Shaw, K. M. Silva, H. Shiokawa, D. R. Smith, W. Snow, K. Souccar, D. Sousa, T. K. Sridharan, R. Srinivasan, W. Stahm, A. A. Stark, K. Story, S. T. Timmer, L. Vertatschitsch, C. Walther, T.-S. Wei, N. Whitehorn, A. R. Whitney, D. P. Woody, J. G. A. Wouterloot, M. Wright, P. Yamaguchi, C.-Y. Yu, M. Zeballos, S. Zhang, L. Ziurys, and Event Horizon Telescope Collaboration. Event Horizon Telescope imaging of the archetypal blazar 3C 279 at an extreme 20 microarcsecond resolution. *A&A*, 640: A69, Aug. 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202037493.
- C. A. Knight, D. S. Robertson, A. E. E. Rogers, I. I. Shapiro, A. R. Whitney, T. A. Clark, R. M. Goldstein, G. E. Marandino, and N. R. Vandenberg. Quasars: Millisecond-of-Arc Structure Revealed by Very-Long-Baseline Interferometry. *Science*, 172(3978):52–54, Apr. 1971. doi: 10.1126/science.172.3978.52.
- P. Kushwaha, S. Chandra, R. Misra, S. Sahayanathan, K. P. Singh, and K. S. Baliyan.

- Evidence for Two Lognormal States in Multi-wavelength Flux Variation of FSRQ PKS 1510-089. *ApJ*, 822(1):L13, May 2016. doi: 10.3847/2041-8205/822/1/L13.
- R. A. Laing, C. R. Jenkins, J. V. Wall, and S. W. Unger. Spectrophotometry of a Complete Sample of 3CR Radio Sources: Implications for Unified Models. In G. V. Bicknell, M. A. Dopita, and P. J. Quinn, editors, *The Physics of Active Galaxies*, volume 54 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 201, Jan. 1994.
- M. Landoni, R. Falomo, A. Treves, R. Scarpa, and D. R. Payá. WHAT IS THE REDSHIFT OF THE GAMMA-RAY BL LAC SOURCE s4 0954+65? *The Astronomical Journal*, 150(6):181, nov 2015. doi: 10.1088/0004-6256/150/6/181. URL <https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/6/181>.
- C. R. Lawrence, T. J. Pearson, A. C. S. Readhead, and S. C. Unwin. New redshifts of strong radio sources. *AJ*, 91:494–495, Mar. 1986. doi: 10.1086/114027.
- C. R. Lawrence, J. R. Zucker, A. C. S. Readhead, S. C. Unwin, T. J. Pearson, and W. Xu. Optical Spectra of a Complete Sample of Radio Sources. I. The Spectra. *ApJS*, 107:541, Dec. 1996. doi: 10.1086/192375.
- T. Li, J.-H. Wu, N.-K. Meng, Y. Dai, and X.-Y. Zhang. Intra-day variability of BL Lacertae from 2016 to 2018. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(10):259, Nov. 2021a. doi: 10.1088/1674-4527/21/10/259.
- X.-P. Li, Y.-H. Luo, H.-T. Yang, H.-Y. Yang, C. Yang, and Y. Cai. Long-term optical color behavior of a sample of blazars. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 18(12):150, Dec. 2018. doi: 10.1088/1674-4527/18/12/150.
- X.-P. Li, L. Zhao, Y. Yan, L.-S. Wang, H.-T. Yang, Y. Cai, and Y.-H. Luo. Detection of quasi-periodic oscillations from the blazar PKS 1510-089. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 42(2):92, Oct. 2021b. doi: 10.1007/s12036-021-09773-9.
- M. M. Lisakov, Y. Y. Kovalev, T. Savolainen, T. Hovatta, and A. M. Kutkin. A connection between γ -ray and parsec-scale radio flares in the blazar 3C 273. *MNRAS*, 468(4):4478–4493, July 2017. doi: 10.1093/mnras/stx710.
- M. L. Lister and P. S. Smith. Intrinsic Differences in the Inner Jets of High and Low Optically Polarized Radio Quasars. *ApJ*, 541(1):66–87, Sept. 2000. doi: 10.1086/309413.
- M. L. Lister, M. F. Aller, H. D. Aller, M. A. Hodge, D. C. Homan, Y. Y. Kovalev, A. B. Pushkarev, and T. Savolainen. MOJAVE. XV. VLBA 15 GHz Total Intensity and Polarization Maps of 437 Parsec-scale AGN Jets from 1996 to 2017. *ApJS*, 234(1):12, Jan. 2018. doi: 10.3847/1538-4365/aa9c44.
- M. L. Lister, D. C. Homan, T. Hovatta, K. I. Kellermann, S. Kiehlmann, Y. Y. Kovalev, W. Max-Moerbeck, A. B. Pushkarev, A. C. S. Readhead, E. Ros, and

- T. Savolainen. MOJAVE. XVII. jet kinematics and parent population properties of relativistically beamed radio-loud blazars. *The Astrophysical Journal*, 874(1):43, mar 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab08ee. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab08ee>.
- M. L. Lister, D. C. Homan, K. I. Kellermann, Y. Y. Kovalev, A. B. Pushkarev, E. Ros, and T. Savolainen. Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XVIII. Kinematics and Inner Jet Evolution of Bright Radio-loud Active Galaxies. *ApJ*, 923(1):30, Dec. 2021. doi: 10.3847/1538-4357/ac230f.
- F. K. Liu, G. Z. Xie, and J. M. Bai. An historical light curve of ON 231 and its periodic analysis. *A&A*, 295:1–10, Mar. 1995.
- H. T. Liu, H. C. Feng, Y. X. Xin, J. M. Bai, S. K. Li, and F. Wang. Search for Intraday Optical Variability in γ -Ray-loud Blazars S5 0716+714 and 3C 273. *ApJ*, 880(2):155, Aug. 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab29fc.
- W.-P. Liu, Y. J. Chen, and C.-C. Wang. An Asymmetrical Synchrotron Model for Knots in the 3C 273 Jet. *ApJ*, 806(2):188, June 2015. doi: 10.1088/0004-637X/806/2/188.
- X.-L. Liu, Y.-H. Yuan, and H.-R. Huang. Optical monitoring and IDV analysis of the blazars S5 0716+714 and 3C 273. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(4):102, May 2021. doi: 10.1088/1674-4527/21/4/102.
- D. Lynden-Bell. Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars. *Nature*, 223(5207):690–694, Aug. 1969. doi: 10.1038/223690a0.
- MAGIC Collaboration, J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, L. A. Antonelli, P. Antoranz, M. Backes, C. Baixeras, J. A. Barrio, H. Bartko, D. Bastieri, J. K. Becker, W. Bednarek, K. Berger, E. Bernardini, C. Bigongiari, A. Biland, R. K. Bock, G. Bonnoli, P. Bordas, V. Bosch-Ramon, T. Bretz, I. Britvitch, M. Camara, E. Carmona, A. Chilingarian, S. Commichau, J. L. Contreras, J. Cortina, M. T. Costado, S. Covino, V. Curtef, F. Dazzi, A. De Angelis, E. de Cea del Pozo, R. de los Reyes, B. De Lotto, M. De Maria, F. De Sabata, C. Delgado Mendez, A. Dominguez, D. Dorner, M. Doro, M. Errando, M. Fagiolini, D. Ferenc, E. Fernández, R. Firpo, M. V. Fonseca, L. Font, N. Galante, R. J. García López, M. Garczarczyk, M. Gaug, F. Goebel, M. Hayashida, A. Herrero, D. Höhne, J. Hose, C. C. Hsu, S. Huber, T. Jogler, T. M. Kneiske, D. Kranich, A. La Barbera, A. Laille, E. Leonardo, E. Lindfors, S. Lombardi, F. Longo, M. López, E. Lorenz, P. Majumdar, G. Maneva, N. Mankuzhiyil, K. Mannheim, L. Maraschi, M. Mariotti, M. Martínez, D. Mazin, M. Meucci, M. Meyer, J. M. Miranda, R. Mirzoyan, S. Mizobuchi, M. Moles, A. Moralejo, D. Nieto, K. Nilsson, J. Ninkovic, N. Otte, I. Oya, M. Panniello, R. Paoletti, J. M. Paredes, M. Pasanen, D. Pascoli, F. Pauss, R. G. Pegna, M. A. Perez-Torres, M. Persic, L. Peruzzo, A. Piccioli, F. Prada, E. Prandini, N. Puchades, A. Raymers, W. Rhode, M. Ribó, J. Rico, M. Rissi, A. Robert, S. Rügamer, A. Saggion, T. Y.

- Saito, M. Salvati, M. Sanchez-Conde, P. Sartori, K. Satalecka, V. Scalzotto, V. Scapin, R. Schmitt, T. Schweizer, M. Shayduk, K. Shinozaki, S. N. Shore, N. Sidro, A. Sierpowska-Bartosik, A. Sillanpää, D. Sobczynska, F. Spanier, A. Stamerra, L. S. Stark, L. Takalo, F. Tavecchio, P. Temnikov, D. Tescaro, M. Teshima, M. Tluczykont, D. F. Torres, N. Turini, H. Vankov, A. Venturini, V. Vitale, R. M. Wagner, W. Wittek, V. Zabalza, F. Zandanel, R. Zanin, and J. Zapatero. Very-High-Energy gamma rays from a Distant Quasar: How Transparent Is the Universe? *Science*, 320(5884):1752, June 2008. doi: 10.1126/science.1157087.
- B. E. Markaryan and V. A. Lipovetskii. Galaxies with ultraviolet continuum V. *Astrophysics*, 8(2):89–99, Apr. 1972. doi: 10.1007/BF01002156.
- A. P. Marscher. Variability of the Non-thermal Emission in the Jets of Blazars. In H. R. Miller, J. R. Webb, and J. C. Noble, editors, *Blazar Continuum Variability*, volume 110 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 248, Jan. 1996.
- P. Marziani, J. W. Sulentic, D. Dultzin-Hacyan, M. Calvani, and M. Moles. Comparative Analysis of the High- and Low-Ionization Lines in the Broad-Line Region of Active Galactic Nuclei. *ApJS*, 104:37, May 1996. doi: 10.1086/192291.
- E. Massaro, M. Maesano, F. Montagni, R. Nesci, G. Tosti, M. Fiorucci, M. Luciani, L. O. Takalo, A. Sillanpää, S. Katajainen, P. Keinänen, T. Pursimo, M. Villata, C. M. Raiteri, G. de Francesco, G. Sobrito, Y. S. Efimov, and N. M. Shakhovskoy. The extraordinary optical outburst of ON 231 (W Com) in spring 1998. *A&A*, 342: L49–L52, Feb. 1999.
- N. Meng, X. Zhang, J. Wu, J. Ma, and X. Zhou. Multi-color Optical Monitoring of 10 Blazars from 2005 to 2011. *ApJS*, 237(2):30, Aug. 2018. doi: 10.3847/1538-4365/aacffe.
- D. A. Morozova, V. M. Larionov, I. S. Troitsky, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, J. L. Gómez, D. A. Blinov, N. V. Efimova, V. A. Hagen-Thorn, E. I. Hagen-Thorn, M. Joshi, T. S. Konstantinova, E. N. Kopatskaya, L. V. Larionova, E. G. Lario-nova, A. Lähteenmäki, J. Tammi, E. Rastorgueva-Foi, I. McHardy, M. Tornikoski, I. Agudo, C. Casadio, S. N. Molina, A. E. Volvach, and L. N. Volvach. THE OUTBURST OF THE BLAZAR s4 0954+658 IN 2011 MARCH-APRIL. *The Astronomical Journal*, 148(3):42, jul 2014. doi: 10.1088/0004-6256/148/3/42. URL <https://doi.org/10.1088/0004-6256/148/3/42>.
- D. W. Murphy, I. W. A. Browne, and R. A. Perley. VLA obseravtions of a complete sample of core-dominated radio source. *MNRAS*, 264:298–318, Sept. 1993. doi: 10.1093/mnras/264.2.298.
- V. Negi, R. Joshi, K. Chand, H. Chand, P. Wiita, L. C. Ho, and R. S. Singh. Optical flux and colour variability of blazars in the ZTF survey. *MNRAS*, 510(2):1791–1800, Feb. 2022. doi: 10.1093/mnras/stab3591.

- H. Netzer. Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei. *ARA&A*, 53: 365–408, Aug. 2015. doi: 10.1146/annurev-astro-082214-122302.
- E. Nieppola, M. Tornikoski, and E. Valtaoja. Spectral energy distributions of a large sample of BL Lacertae objects. *A&A*, 445(2):441–450, Jan. 2006. doi: 10.1051/0004-6361:20053316.
- K. Nilsson, T. Pursimo, C. Villforth, E. Lindfors, and L. O. Takalo. The host galaxy of 3C 279. *A&A*, 505(2):601–604, Oct. 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200912820.
- K. Nilsson, J. Kotilainen, M. Valtonen, J. L. Gomez, A. J. Castro-Tirado, M. Drozd, A. Gopakumar, S. Jeong, M. Kidger, S. Komossa, S. Mathur, I. H. Park, D. E. Reichart, and S. Zola. The Host Galaxy of OJ 287 Revealed by Optical and Near-infrared Imaging. *ApJ*, 904(2):102, Dec. 2020. doi: 10.3847/1538-4357/abbda1.
- J. Otero-Santos, J. A. Acosta-Pulido, J. Becerra González, A. Luashvili, N. Castro Segura, O. González-Martín, C. M. Raiteri, and M. I. Carnerero. A statistical study of the optical spectral variability in gamma-ray blazars. *MNRAS*, 511(4): 5611–5638, Apr. 2022. doi: 10.1093/mnras/stac475.
- P. Padovani. The faint radio sky: radio astronomy becomes mainstream. *A&A Rev.*, 24(1):13, Sept. 2016. doi: 10.1007/s00159-016-0098-6.
- P. Padovani. On the two main classes of active galactic nuclei. *Nature Astronomy*, 1: 0194, Aug. 2017. doi: 10.1038/s41550-017-0194.
- P. Padovani and P. Giommi. The Connection between X-Ray- and Radio-selected BL Lacertae Objects. *ApJ*, 444:567, May 1995. doi: 10.1086/175631.
- P. Padovani, D. M. Alexander, R. J. Assef, B. De Marco, P. Giommi, R. C. Hickox, G. T. Richards, V. Smolčić, E. Hatziminaoglou, V. Mainieri, and M. Salvato. Active galactic nuclei: what’s in a name? *A&A Rev.*, 25(1):2, Aug. 2017. doi: 10.1007/s00159-017-0102-9.
- S. Paiano, M. Landoni, R. Falomo, A. Treves, R. Scarpa, and C. Righi. On the Redshift of TeV BL Lac Objects. *ApJ*, 837(2):144, Mar. 2017. doi: 10.3847/1538-4357/837/2/144.
- I. E. Papadakis, P. Boumis, V. Samaritakis, and J. Papamastorakis. Multi-band optical micro-variability observations of BL Lacertae. *A&A*, 397:565–573, Jan. 2003. doi: 10.1051/0004-6361:20021581.
- B. G. Piner and K. A. Kingham. VLBI Observations of the Gamma-Ray Blazar 1611+343. *ApJ*, 479(2):684–693, Apr. 1997. doi: 10.1086/303919.
- R. Prince, N. Gupta, and K. Nalewajko. Two-zone Emission Modeling of PKS 1510-089 during the High State of 2015. *ApJ*, 883(2):137, Oct. 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab3afa.

- J. Quinn, C. W. Akerlof, S. Biller, J. Buckley, D. A. Carter-Lewis, M. F. Cawley, M. Catanese, V. Connaughton, D. J. Fegan, J. P. Finley, J. Gaidos, A. M. Hillas, R. C. Lamb, F. Krennrich, R. Lessard, J. E. McEnery, D. I. Meyer, G. Mohanty, A. J. Rodgers, H. J. Rose, G. Sembroski, M. S. Schubnell, T. C. Weekes, C. Wilson, and J. Zweerink. Detection of Gamma Rays with $E > 300$ GeV from Markarian 501. *ApJ*, 456:L83, Jan. 1996. doi: 10.1086/309878.
- C. M. Raiteri, M. Villata, V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, Z. R. Weaver, J. A. Acosta-Pulido, I. Agudo, T. Andreeva, A. Arkharov, R. Bachev, E. Benítez, M. Berton, I. Björklund, G. A. Borman, V. Bozhilov, M. I. Carnerero, D. Carosati, C. Casadio, W. P. Chen, G. Damjanovic, F. D’Ammando, J. Escudero, A. Fuentes, M. Giroletti, T. S. Grishina, A. C. Gupta, V. A. Hagen-Thorn, M. Hart, D. Hiriart, W. J. Hou, D. Ivanov, J. Y. Kim, G. N. Kimeridze, C. Konstantopoulou, E. N. Kopatskaya, O. M. Kurtanidze, S. O. Kurtanidze, A. Lähteenmäki, E. G. Larionova, L. V. Larionova, N. Marchili, G. Markovic, M. Minev, D. A. Morozova, I. Myserlis, M. Nakamura, A. A. Nikiforova, M. G. Nikolashvili, J. Otero-Santos, E. Ovcharov, T. Pursimo, I. Rahimov, S. Righini, T. Sakamoto, S. S. Savchenko, E. H. Semkov, D. Shakhovskoy, L. A. Sigua, M. Stojanovic, A. Strigachev, C. Thum, M. Tornikoski, E. Traianou, Y. V. Troitskaya, I. S. Troitskiy, A. Tsai, A. Valcheva, A. A. Vasilyev, O. Vince, and E. Zaharieva. The complex variability of blazars: time-scales and periodicity analysis in S4 0954+65. *MNRAS*, 504(4):5629–5646, July 2021. doi: 10.1093/mnras/stab1268.
- S. Rakshit. Broad line region and black hole mass of PKS 1510-089 from spectroscopic reverberation mapping. *A&A*, 642:A59, Oct. 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202038324.
- G. E. Romero. The content of astrophysical jets. *Astronomische Nachrichten*, 342(5):727–734, June 2021. doi: 10.1002/asna.202113989.
- P. Z. Safna, C. S. Stalin, S. Rakshit, and B. Mathew. Long-term optical and infrared variability characteristics of Fermi blazars. *MNRAS*, 498(3):3578–3591, Nov. 2020. doi: 10.1093/mnras/staa2622.
- R. M. Sambruna, C. M. Urry, F. Tavecchio, L. Maraschi, R. Scarpa, G. Chartas, and T. Muxlow. Chandra Observations of the X-Ray Jet of 3C 273. *ApJ*, 549(2):L161–L165, Mar. 2001. doi: 10.1086/319157.
- A. Sandrinelli, S. Covino, M. Dotti, and A. Treves. Quasi-periodicities at Year-like Timescales in Blazars. *AJ*, 151(3):54, Mar. 2016. doi: 10.3847/0004-6256/151/3/54.
- A. Sarkar, V. R. Chitnis, A. C. Gupta, H. Gaur, S. R. Patel, P. J. Wiita, A. E. Volvach, M. Tornikoski, W. Chamani, S. Enestam, A. Lähteenmäki, J. Tammi, R. J. C. Vera, and L. N. Volvach. Long-term Variability and Correlation Study of the Blazar 3C 454.3 in the Radio, NIR, and Optical Wavebands. *ApJ*, 887(2):185, Dec. 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab5281.

- T. Savolainen, K. Wiik, E. Valtaoja, and M. Tornikoski. Multifrequency VLBA monitoring of 3C 273 during the INTEGRAL Campaign in 2003. I. Kinematics of the parsec scale jet from 43 GHz data. *A&A*, 446(1):71–85, Jan. 2006. doi: 10.1051/0004-6361:20053753.
- M. Schmidt. 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift. *Nature*, 197(4872): 1040, Mar. 1963. doi: 10.1038/1971040a0.
- D. P. Schneider, G. T. Richards, P. B. Hall, M. A. Strauss, S. F. Anderson, T. A. Boroson, N. P. Ross, Y. Shen, W. N. Brandt, X. Fan, N. Inada, S. Jester, G. R. Knapp, C. M. Krawczyk, A. R. Thakar, D. E. Vanden Berk, W. Voges, B. Yanny, D. G. York, N. A. Bahcall, D. Bizyaev, M. R. Blanton, H. Brewington, J. Brinkmann, D. Eisenstein, J. A. Frieman, M. Fukugita, J. Gray, J. E. Gunn, P. Hibon, Ž. Ivezić, S. M. Kent, R. G. Kron, M. G. Lee, R. H. Lupton, E. Malanushenko, V. Malanushenko, D. Oravetz, K. Pan, J. R. Pier, I. Price, Ted N., D. H. Saxe, D. J. Schlegel, A. Simmons, S. A. Snedden, M. U. SubbaRao, A. S. Szalay, and D. H. Weinberg. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release. *AJ*, 139(6):2360, June 2010. doi: 10.1088/0004-6256/139/6/2360.
- C. K. Seyfert. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. *ApJ*, 97:28, Jan. 1943. doi: 10.1086/144488.
- N. I. Shakura. Disk Model of Gas Accretion on a Relativistic Star in a Close Binary System. *Soviet Ast.*, 16:756, Apr. 1973.
- N. I. Shakura and R. A. Sunyaev. Black holes in binary systems. Observational appearance. *A&A*, 24:337–355, Jan. 1973.
- Z. Shang, M. S. Brotherton, B. J. Wills, D. Wills, S. L. Cales, D. A. Dale, R. F. Green, J. C. Runnoe, R. S. Nemmen, S. C. Gallagher, R. Ganguly, D. C. Hines, B. J. Kelly, G. A. Kriss, J. Li, B. Tang, and Y. Xie. The Next Generation Atlas of Quasar Spectral Energy Distributions from Radio to X-Rays. *ApJS*, 196(1):2, Sept. 2011. doi: 10.1088/0067-0049/196/1/2.
- H. Siejkowski and A. Wierzholska. Characterizing long-term optical, ultraviolet and X-ray variability in different activity states of OJ 287. *MNRAS*, 468(1):426–434, June 2017. doi: 10.1093/mnras/stx495.
- A. Sillanpää, S. Haarala, M. J. Valtonen, B. Sundelius, and G. G. Byrd. OJ 287: Binary Pair of Supermassive Black Holes. *ApJ*, 325:628, Feb. 1988. doi: 10.1086/166033.
- Ł. Stawarz. On the Jet Activity in 3C 273. *ApJ*, 613(1):119–128, Sept. 2004. doi: 10.1086/423022.
- M. Stickel, J. W. Fried, and H. Kuehr. Optical spectroscopy of 1 Jy BL Lacertae objects and flat spectrum radio sources. *A&AS*, 80:103–114, Oct. 1989.

- M. Stickel, J. W. Fried, and H. Kuehr. The complete sample of 1 Jy BL Lac objects. II. Observational data. *A&AS*, 98:393–442, May 1993.
- D. J. Thompson, S. Djorgovski, and R. de Carvalho. Spectroscopy of Radio Sources from the Parkes 2700 MHz Survey. *PASP*, 102:1235, Nov. 1990. doi: 10.1086/132758.
- L. Titarchuk and E. Seifina. BL Lacertae: X-ray spectral evolution and a black-hole mass estimate. *A&A*, 602:A113, June 2017. doi: 10.1051/0004-6361/201630280.
- J. Torrealba, V. Chavushyan, I. Cruz-González, T. G. Arshakian, E. Bertone, and D. Rosa-González. Optical Spectroscopic Atlas of the MOJAVE/2cm AGN Sample. *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 48:9–40, Apr. 2012.
- G. Tosti, M. Fiorucci, M. Luciani, N. Rizzi, M. Villata, C. M. Raiteri, G. de Francesco, L. Lanteri, M. Chiaberge, A. Peila, M. Cavallone, G. Sobrito, M. Maesano, E. Massaro, F. Montagni, R. Nesci, G. Ghisellini, L. O. Takalo, A. Sillanpää, S. Katajainen, P. Heinaemaeki, K. Nilsson, and T. Pursimo. BVR_{cI}c monitoring of ON 231 during the great outburst in 1994-1997. *A&AS*, 130:109–115, May 1998. doi: 10.1051/aas:1998215.
- M.-H. Ulrich, L. Maraschi, and C. M. Urry. Variability of Active Galactic Nuclei. *ARA&A*, 35:445–502, Jan. 1997. doi: 10.1146/annurev.astro.35.1.445.
- R. C. Vermeulen, P. M. Ogle, H. D. Tran, I. W. A. Browne, M. H. Cohen, A. C. S. Readhead, G. B. Taylor, and R. W. Goodrich. When Is BL Lac Not a BL Lac? *ApJ*, 452:L5, Oct. 1995. doi: 10.1086/309716.
- M. Villata, C. M. Raiteri, O. M. Kurtanidze, M. G. Nikolashvili, M. A. Ibrahimov, I. E. Papadakis, K. Tsinganos, K. Sadakane, N. Okada, L. O. Takalo, A. Sillanpää, G. Tosti, S. Ciprini, A. Frasca, E. Marilli, R. M. Robb, J. C. Noble, S. G. Jorstad, V. A. Hagen-Thorn, V. M. Larionov, R. Nesci, M. Maesano, R. D. Schwartz, J. Basler, P. W. Gorham, H. Iwamatsu, T. Kato, C. Pullen, E. Benítez, J. A. de Diego, M. Moilanen, A. Oksanen, D. Rodriguez, A. C. Sadun, M. Kelly, M. T. Carini, H. R. Miller, S. Catalano, D. Dultzin-Hacyan, J. H. Fan, R. Ishioka, H. Karttunen, P. Keinänen, N. A. Kudryavtseva, M. Lainela, L. Lanteri, E. G. Larionova, K. Matsumoto, J. R. Mattox, F. Montagni, G. Nucciarelli, L. Ostorero, J. Papanastorakis, M. Pasanen, G. Sobrito, and M. Uemura. The WEBT BL Lacertae Campaign 2000. *A&A*, 390:407–421, Aug. 2002. doi: 10.1051/0004-6361:20020662.
- A. E. Vol’vach, A. M. Kutkin, L. N. Vol’vach, M. G. Larionov, A. Lakhteenmaki, M. Tornikoski, E. Nieppola, J. Tammi, P. Savolainen, J. Leon-Tavares, M. F. Aller, and H. D. Aller. Results of long-term monitoring of 3C 273 over a wide range of wavelengths. *Astronomy Reports*, 57(1):34–45, Jan. 2013. doi: 10.1134/S1063772912050083.

- S. Wagner, F. Sanchez-Pons, A. Quirrenbach, and A. Witzel. Simultaneous optical and radio monitoring of rapid variability in quasars and bl lac objects. *Astronomy and Astrophysics*, 235:L1–L4, 1990.
- S. J. Wagner, A. Witzel, T. P. Krichbaum, R. Wegner, A. Quirrenbach, K. Anton, U. Erkens, R. Khanna, and A. Zensus. Intraday variability in the BL Lac object 0954+658. *A&A*, 271:344–347, Apr. 1993.
- F. Wang, J. Yang, X. Fan, J. F. Hennawi, A. J. Barth, E. Banados, F. Bian, K. Boutsia, T. Connor, F. B. Davies, R. Decarli, A.-C. Eilers, E. P. Farina, R. Green, L. Jiang, J.-T. Li, C. Mazzucchelli, R. Nanni, J.-T. Schindler, B. Venemans, F. Walter, X.-B. Wu, and M. Yue. A Luminous Quasar at Redshift 7.642. *ApJ*, 907(1): L1, Jan. 2021. doi: 10.3847/2041-8213/abd8c6.
- A. R. Whitney, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, D. S. Robertson, C. A. Knight, T. A. Clark, R. M. Goldstein, G. E. Marandino, and N. R. Vandenberg. Quasars Revisited: Rapid Time Variations Observed Via Very-Long-Baseline Interferometry. *Science*, 173(3993):225–230, July 1971. doi: 10.1126/science.173.3993.225.
- A. Wiercholska, M. Ostrowski, Ł. Stawarz, S. Wagner, and M. Hauser. Long-term optical monitoring of bright BL Lacertae objects with ATOM: Spectral variability and multiwavelength correlations. *A&A*, 573:A69, Jan. 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201423967.
- Z.-Z. Wu, M.-F. Gu, and D.-R. Jiang. The debeamed luminosity, sychrotron peak frequency and black hole mass of BL Lac objects. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 9(2):168–178, Feb. 2009. doi: 10.1088/1674-4527/9/2/006.
- G. Z. Xie, T. F. Yi, H. Z. Li, S. B. Zhou, and L. E. Chen. Periodicity Analysis of the Radio Curve of PKS 1510-089 and Implications for its Central Structure. *AJ*, 135(6):2212–2216, June 2008. doi: 10.1088/0004-6256/135/6/2212.
- Y.-H. Yuan, J.-H. Fan, H. Wu, J.-M. Hao, W.-R. Huang, X.-L. Liu, and H.-R. Huang. Optical monitoring and intra-day variabilities of BL Lac Objects OJ 287. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(6):138, Aug. 2021. doi: 10.1088/1674-4527/21/6/138.
- B.-K. Zhang, M. Jin, X.-Y. Zhao, L. Zhang, and B.-Z. Dai. Long-term multi-wavelength variations of Fermi blazar 3C 279. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(8):186, Oct. 2021. doi: 10.1088/1674-4527/21/8/186.
- B.-K. Zhang, X.-Y. Zhao, and Q. Wu. Optical Spectral Variations of a Large Sample of Fermi Blazars. *ApJS*, 259(2):49, Apr. 2022. doi: 10.3847/1538-4365/ac5a52.
- Z.-X. Zhang, P. Du, P. S. Smith, Y. Zhao, C. Hu, M. Xiao, Y.-R. Li, Y.-K. Huang, K. Wang, J.-M. Bai, L. C. Ho, and J.-M. Wang. Kinematics of the Broad-line Region of 3C 273 from a 10 yr Reverberation Mapping Campaign. *ApJ*, 876(1):49, May 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab1099.

G.-Y. Zhao, J. L. Gomez, A. Fuentes, T. P. Krichbaum, E. Traianou, R. Lico, I. Cho, E. Ros, S. Komossa, K. Akiyama, K. Asada, L. Blackburn, S. Britzen, G. Bruni, G. Crew, R. Dahale, L. Dey, R. Gold, A. Gopakumar, S. Issaoun, M. Janssen, S. G. Jorstad, J.-Y. Kim, J. Y. Koay, Y. Y. Kovalev, S. Koyama, A. Lobanov, L. Loinard, R. Lu, S. Markoff, A. P. Marscher, I. Marti-Vidal, Y. Mizuno, J. Park, T. Savolainen, and T. Toscano. Unravelling the Innermost Jet Structure of OJ 287 with the First GMVA+ALMA Observations. *arXiv e-prints*, art. arXiv:2205.00554, May 2022.