

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Fotometría Astronómica de Supernovas

Elaborado por

Miguel Lorenzo Antonio Espinoza Panduro

Orcid:0000-0002-1585-5007

Asesor

PhD. Antonio Armstrong Pereyra Quirós

Orcid:0000-0001-8403-8070

Lima-Perú

2025

Citar/How to cite	Espinoza Panduro [1]
Referencia/Reference	[1] M. Espinoza Panduro, <i>Fotometría Astronómica de Supernovas</i> [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Inge- niería,
Estilo/Style:	2025.
IEEE	

Citar/How to cite	(Espinoza, 2025)
Referencia/Reference	Espinoza, M. (2025). <i>Fotometría Astronómica de Superno-</i> <i>vas</i> [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
Estilo/Style:	Repositorio Institucional UNI.
APA (7ma ed.)	

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Ingeniería por la formación académica.

Al apoyo económico del Concytec (Contrato No PE501081907-2022-PROCIENCIA, Contrato 133-2020 Fondecyt).

Al Dr. Antonio Pereyra por el apoyo y guía brindados.

A mi familia por acompañarme todos estos años.

Un agradecimiento especial al personal del Observatorio Huancayo por el apoyo logístico y J.

Tello, M. Zevallos, J. Ricra, R.

Santacruz, D. Alvarado y E. Torre por su colaboración con las observaciones.

Resumen

En este trabajo se analizan datos fotométricos de un grupo seleccionado de eventos de supernovas observadas desde el Observatorio Astronómico de la UNI (OAUNI) en los años 2016, 2017 y 2023. Se tomaron medidas cuidadosas en la reducción de las imágenes astronómicas para minimizar el impacto de variaciones climáticas. Las magnitudes fotométricas de nueve eventos fueron calculadas en varios filtros: R (rojo), V (visual) e I (infrarrojo), lo que permitió un análisis detallado. Se estudiaron las supernovas AT 2015dd¹, SN 2016cvk y SN 2023gfo en los tres filtros, mientras que las supernovas AT 2016eqb y SN 2017erp fueron observadas en los filtros R y V, y las supernovas AT 2017erv, AT 2017eve, SN 2023ijd y SN 2023ixf solo en el filtro R. La fotometría multicolor de las primeras tres supernovas permitió su ubicación en el diagrama color-color, y se vinculó el corrimiento al rojo para determinar el tiempo transcurrido hasta el máximo de brillo. Las comparaciones con curvas de luz existentes ayudaron a estudiar el comportamiento de los eventos. Para algunas supernovas, como la AT 2017erp, se calcularon parámetros como el stretch y el parámetro s_{BV} , ubicando a la supernova en el gráfico s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$. Este estudio confirma la factibilidad de realizar fotometría astronómica precisa de supernovas en el OAUNI.

Palabras clave - Supernova, curva de luz, fotometría, reducción.

¹Se presenta el nombre designada a la supernova por la IAU (Unión Astronómica Internacional)

Abstract

This paper analyzes photometric data of a selected group of supernova events observed at the UNI Astronomical Observatory (OAUNI) in 2016, 2017, and 2023. Careful attention was given to the reduction of astronomical images to minimize the impact of climatic variations. Photometric magnitudes were calculated for nine events in various filters: R (red), V (visual), and I (infrared). Supernovas AT 2015dd, SN 2016cvk, and SN 2023gfo were observed in all three filters, while AT 2016eqb and SN 2017erp were observed in R and V, and AT 2017erv, AT 2017eve, SN 2023ijd, and SN 2023ixf only in R. Multicolor photometry of the first three supernovas enabled their placement in the color-color diagram, and their redshift was linked to determine the time elapsed until the peak brightness. Comparisons with existing light curves helped study the behavior of these events. For some supernovas, such as AT 2017erp, parameters like the stretch and s_{BV} were calculated, placing the supernova in the s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$ graph. This study confirms the feasibility of performing precise supernova photometry at OAUNI.

Keywords - Supernova, light curve, photometry, reduction.

Tabla de Contenido

Resumen	IV
Abstract	V
Introducción	XVII
I Parte introductoria del trabajo	1
A Objetivos del estudio	1
1) Objetivo general	1
2) Objetivos específicos	1
B Antecedentes	2
1) AT 2015dd	2
2) SN 2016cvk	3
3) AT 2016eqb	3
4) SN 2017erp	4
5) AT 2017erv	4
6) AT 2017eve	5
7) SN 2023gfo	6
8) SN 2023ijd	6
9) SN 2023ixf	7
II Marco teórico y conceptual	8
A Marco teórico	8
1) Supernovas	8
2) Clasificación	8
3) SN Tipo Ia	9
4) SN Tipo Ib	11
5) SN Tipo IIn	12

6)	SN Tipo IIp	13
7)	Curva de luz de SN Ia	14
8)	Curva de luz de SN IIn	17
9)	Curva de luz de SN IIp	19
10)	Parámetro $\Delta m_{15}(B)$	20
11)	Parámetro de <i>stretch</i> (s)	22
12)	Parámetro de <i>Stretch-Color</i> (s_{BV})	24
13)	Diagrama Color-Color	26
B	Marco conceptual	28
1)	Magnitud aparente	28
2)	Módulo de distancia (μ)	29
3)	Catálogos Astronómicos	30
4)	Día Juliano	30
5)	Día Juliano Heliocéntrico (HJD)	31
C	Técnicas utilizadas	31
1)	Fotometría	31
2)	Fotometría de apertura	31
3)	Fotometría Diferencial	33
III	Desarrollo experimental y eventos de Supernovas analizados	34
A	Telescopio	34
B	Base de datos	35
C	Estructura metodológica	35
D	Selección de estrellas de comparación	38
E	Entorno computacional	38
IV	Análisis y discusión de resultados	39

A	AT 2015dd	39
	1) Observaciones desde el OAUNI	39
	2) Fotometría	41
B	2016cvk	47
	1) Observaciones desde el OAUNI	47
	2) Fotometría	49
C	AT 2016eqb	55
	1) Observaciones desde el OAUNI	55
	2) Fotometría	56
D	2017erp	62
	1) Observaciones desde el OAUNI	62
	2) Fotometría	64
	3) Parámetro $\Delta m_{15}(B)$	69
	4) Parámetro de <i>Stretch</i>	72
	5) Parámetro de <i>Stretch-Color</i>	74
E	AT 2017erv	76
	1) Observaciones desde el OAUNI	76
	2) Fotometría	78
F	AT 2017eve	82
	1) Observaciones desde el OAUNI	82
	2) Fotometría	84
G	SN 2023gfo	87
	1) Observaciones desde el OAUNI	87
	2) Fotometría	90
H	SN 2023ijd	95
	1) Observaciones desde el OAUNI	95

2)	Fotometría	97
I	SN 2023ixf	101
1)	Observaciones desde el OAUNI	101
2)	Fotometría	104
v	Conclusiones	108
vi	Referencias bibliográficas	112

Lista de Tablas

Tabla I:	Registro de observación de la SN AT 2015dd	40
Tabla II:	Estrellas de comparación de la SN AT 2015dd	42
Tabla III:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN AT 2015dd	43
Tabla IV:	Magnitudes calibradas por el método m_1 de la SN AT 2015dd	44
Tabla V:	Coeficientes del método de calibración m_2 de la SN AT 2015dd	45
Tabla VI:	Magnitudes calibradas por el método m_2 de la SN AT 2015dd	45
Tabla VII:	Valores de los colores $V-R$ y $R-I$ de la SN AT 2015dd	45
Tabla VIII:	Registro de observación de la SN 2016cvk	48
Tabla IX:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN 2016cvk	50
Tabla X:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN 2016cvk	51
Tabla XI:	Magnitudes calibradas por el método de calibración m_1 de la SN 2016cvk	51
Tabla XII:	Coeficientes del método de calibración m_2 de la sec. 1 de la SN 2016cvk	51
Tabla XIII:	Coeficientes del método de calibración m_2 de la sec. 2 de la SN 2016cvk	52
Tabla XIV:	Magnitudes calibradas por el método m_2 de la SN 2016cvk	52
Tabla XV:	Valores de los colores $V-R$ y $R-I$ de la SN 2016cvk	52
Tabla XVI:	Registro de observación de la SN AT 2016eqb	56
Tabla XVII:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN AT 2016eqb	57
Tabla XVIII:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN AT 2016eqb	59
Tabla XIX:	Coeficientes del método de calibración m_2 de la SN AT 2016eqb	59
Tabla XX:	Magnitudes calibradas y color $V-R$ de la SN AT 2016eqb	59
Tabla XXI:	Registro de observación en los primeros cuatro días de la SN SN2017erp	63
Tabla XXII:	Registro de observación en los siguientes cuatro días de la SN SN2017erp	63
Tabla XXIII:	Registro de observación en los últimos tres días de la SN SN2017erp	63
Tabla XXIV:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN 2017erp	65

Tabla XXV:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN 2017erp	66
Tabla XXVI:	Coeficientes del método de calibración m_2 de la SN 2017erp en el filtro V	66
Tabla XXVII:	Coeficientes del método de calibración m_2 de la SN 2017erp en el filtro R	67
Tabla XXVIII:	Magnitudes calibradas de la SN 2017erp por ambos métodos	67
Tabla XXIX:	Valores de el modulo de distancia y la distancia relativa de la SN 2017erp para los filtro B , V e I	72
Tabla XXX:	Registro de observación de la SN AT 2017erv	77
Tabla XXXI:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN AT 2017erv	80
Tabla XXXII:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN AT 2017erv	80
Tabla XXXIII:	Magnitudes calibradas por el método m_1 de la SN AT 2017erv	80
Tabla XXXIV:	Registro de observación de la SN AT 2017eve	82
Tabla XXXV:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN AT 2017eve	85
Tabla XXXVI:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN AT 2017eve	85
Tabla XXXVII:	Magnitudes calibradas por el método m_1 de la SN AT 2017eve	86
Tabla XXXVIII:	Registro de observación de los primeros 5 días de la SN 2023gfo	88
Tabla XXXIX:	Registro de observación en los siguientes 5 días de la SN 2023gfo	88
Tabla XL:	Registro de observación de los últimos 4 días de la SN 2023gfo	88
Tabla XLI:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN 2023gfo	91
Tabla XLII:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN 2023gfo	91
Tabla XLIII:	Magnitudes calibradas por el método m_1 de la SN 2023gfo	92
Tabla XLIV:	Coeficientes del método de calibración m_2 de la SN 2023gfo	92
Tabla XLV:	Magnitudes calibradas por el método m_2 y colores $V-R$ y $R-I$ de la SN 2023gfo	93
Tabla XLVI:	Registro de observación de las primera 3 noches de la SN 2023ijd	96
Tabla XLVII:	Registro de observación de las ultimas 3 noches de la SN 2023ijd	96
Tabla XLVIII:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN 2023ijd	99

Tabla XLIX:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN 2023ijd	100
Tabla L:	Magnitudes calibradas por el método m_1 de la SN 2023ijd	100
Tabla LI:	Registro de observación de la SN 2023ixf	102
Tabla LII:	Registro de observación de la SN 2023ixf	102
Tabla LIII:	Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN 2023ixf	105
Tabla LIV:	Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN 2023ixf	105
Tabla LV:	Magnitudes calibradas por el método m_1 de la SN 2023ixf	106

Lista de Figuras

Figura I.	Clasificación de las SNe	9
Figura II.	Explosión de una enana blanca	10
Figura III.	Lineas espectrales de una SN Ib	11
Figura IV.	Ciclo de vida de una SN Tipo IIn (https://www.adamfrankscience.com/).	12
Figura V.	Curva de luz típica de una SN tipo IIp	14
Figura VI.	Curvas de luz para distintos tipos de SNe	15
Figura VII.	Espectro de una SN tipo Ia en los días próximos al máximo de brillo	15
Figura VIII.	Gráficos comparativos del brillo de una SN con su espectro para fechas antes del máximo de brillo	16
Figura IX.	Gráficos comparativos del brillo de una SN con su espectro para fechas durante el máximo de brillo	16
Figura X.	Gráficos comparativos del brillo de una SN con su espectro para fechas posteriores al máximo de brillo	16
Figura XI.	Curvas de luz de distintas SNe tipo IIn	18
Figura XII.	Curvas de luz históricas de SNe tipo IIp	19
Figura XIII.	Curva de luz de la SN 1987A	20
Figura XIV.	Brillo (filtro B) vs. tiempo corregido de una SNe tipo Ia	21
Figura XV.	Magnitud máxima (M_{max}) vs. $\Delta m_{15}(B)$ para varias SNe tipo Ia en los filtros B, V e I	21
Figura XVI.	Distintas curvas de luz de SNe estandarizadas	23
Figura XVII.	Medición del parámetro s_{BV} para diferentes SNe tipo Ia	25
Figura XVIII.	s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$ de SNe tipo Ia	25
Figura XIX.	Diagrama color-color con $redshift = 0$ para distintos tipos de SNe	26
Figura XX.	Diagrama color-color $redshift = 0.1$ para distintos tipos de SNe	27

Figura XXI.	Diagrama color-color $redshift = 0.5$ para distintos tipos de SNe	27
Figura XXII.	Fotometría de apertura circular sobre una estrella usando tres aperturas .	32
Figura XXIII.	Fotometría diferencial sobre una estrella variable usando tres estrellas de comparación en cinco distintos instantes de tiempo	33
Figura XXIV.	Equipamiento del <i>OAUNI</i> e instrumentos instalados en el Observatorio de Huancayo	34
Figura XXV.	Diagrama de flujo para esquematizar la metodología de la reducción de imágenes.	36
Figura XXVI.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN AT 2015dd	39
Figura XXVII.	Control de calidad para los datos de la SN AT 2015dd	41
Figura XXVIII.	Campo estelar de la SN AT 2015dd	42
Figura XXIX.	SN AT 2015dd en el diagrama $V-R$ vs. $R-I$	46
Figura XXX.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN 2016cvk	47
Figura XXXI.	Control de calidad para los datos de la SN 2016cvk	49
Figura XXXII.	Campo estelar de la SN 2016cvk	50
Figura XXXIII.	SN 2016cvk en el diagrama $V-R$ vs. $R-I$	53
Figura XXXIV.	Curva de luz en el filtro V de la SN 2016cvk	54
Figura XXXV.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN AT 2016eqb	55
Figura XXXVI.	Control de calidad para los datos de la SN AT 2016eqb	57
Figura XXXVII.	Campo estelar de la SN AT 2016eqb	58
Figura XXXVIII.	Curva de luz de la SN AT 2016eqb	60
Figura XXXIX.	SN AT 2016eqb en el diagrama $V-R$ vs. $R-I$	61
Figura XL.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN 2017erp	62
Figura XLI.	Control de calidad para los datos de la SN 2017erp	64
Figura XLII.	Campo estelar de la SN 2017erp	65
Figura XLIII.	Curva de luz de la SN 2017erp en el filtro V	68

Figura XLIV.	Curva de luz de la SN 2017erp en el filtro R	68
Figura XLV.	Ajuste polinomial a la curva de luz de la SN 2017erp en el filtro B	70
Figura XLVI.	Comparación de la SN 2017erp y nueve SNe típicas en el diagrama Magnitud absoluta en el filtro B vs. $\Delta m_{15}(B)$	70
Figura XLVII.	Ajuste polinómico a la curva de luz de la SN 2017erp en el filtro B	73
Figura XLVIII.	Corrección de parámetros a la curva de luz de la SN 2017erp para el filtro B	74
Figura XLIX.	SN 2017erp en el diagrama $(B-V)-(B-V)_{max}$ vs. t	75
Figura L.	SN 2017erp en el diagrama s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$	76
Figura LI.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN AT 2017erv	76
Figura LII.	Control de calidad para los datos de la SN AT 2017erv	77
Figura LIII.	Campo estelar de la SN AT 2017erv	79
Figura LIV.	Curva de luz en los filtro V y R de la SN AT 2017erv	81
Figura LV.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN AT 2017eve	82
Figura LVI.	Control de calidad para los datos de la SN AT 2017eve	83
Figura LVII.	Campo estelar de a la SN AT 2017eve	84
Figura LVIII.	Curvas de luz en los filtros V y R de la SN AT 2017eve	86
Figura LIX.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN 2023gfo	87
Figura LX.	Control de calidad para los datos de la SN 2023gfo	89
Figura LXI.	Campo estelar de a la SN 2023gfo	90
Figura LXII.	SN 2023gfo en el diagrama $V-R$ vs. $R-I$	93
Figura LXIII.	Curva de luz en el filtro R de la SN 2023gfo	94
Figura LXIV.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN 2023ijd	96
Figura LXV.	Control de calidad para los datos de la SN 2023ijd	97
Figura LXVI.	Campo estelar de la SN 2023ijd	98
Figura LXVII.	Curva de luz en el filtro R de la SN AT 2023ijd	101
Figura LXVIII.	Imágenes de las primeras observaciones de la SN 2023ixf	102

Figura LXIX.	Control de calidad para los datos de la SN 2023ixf	103
Figura LXX.	Campo estelar de la SN 2023ixf	104
Figura LXXI.	Curva de luz en el filtro R de la SN 2023ixf	106

Introducción

Uno de los eventos estelares más interesantes que podemos encontrar en astronomía son las supernovas (SNe). Son eventos de gran liberación energética que siguen al colapso de una estrella que termina su vida en una poderosa explosión, que casi siempre deja tras de sí un remanente gaseoso estelar compacto y en expansión.

Los primeros registros que se tienen de estos eventos provienen del siglo II por parte de los astrónomos chinos. Ellos observaron y guardaron registro de objetos que se vislumbraban repentinamente en el cielo y que eran visibles por un cierto período de tiempo antes de luego desaparecer. Esto era así debido a que las SNe históricas se encontraban relativamente cerca en la Galaxia. Esto significaba que sus distancias eran de unos pocos kpc, sabiendo que el Sol está a 8.5 kpc del centro de nuestra Galaxia. Fue hasta el siglo XX que estos objetos eran denominados como novas, debido a que el gran aumento en el brillo del objeto era interpretado como el nacimiento de una nueva estrella en el cielo. Pero no fue hasta que las distancias a las galaxias más cercanas fueran establecidas a través de la observación de estrellas variables Cefeidas, que se logró la distinción entre dos tipos de eventos: unos menos brillantes, a los que se los siguió denominando novas, y otros extremadamente brillantes a los que se les llamó supernovas [30].

En general, la importancia de una explosión de supernova (SN) radica en su relativo corto tiempo de duración, alcanzando su luminosidad máxima en 20 días y con una posterior disminución lenta. Después de 50 días, el brillo comienza a seguir una disminución exponencial, disminuyendo a una tasa de aproximadamente una magnitud por mes. Este brillo representa a su vez un método de clasificación basado en la comparación de sus colores observados cuando la espectroscopia puede no ser posible o práctica. Asimismo, la fotometría de banda ancha en longitudes de onda infrarrojas permite la clasificación de eventos lejanos que se encuentran fuera de la Vía Láctea.

El aspecto de su detección se vió agravado aún más cuando se descubrió que las SNe

ocurrían sin previo aviso. Si bien es cierto que estas explosiones tienen lugar en ciertos tipos de estrellas en una etapa determinada de sus vidas, la señal que mostraban de una explosión era poca o ninguna. Este hecho evidencia porque durante la mayor parte de la historia astronómica, las SNe han sido descubiertas por casualidad, cuando ya habían ocurrido. Si a esto le sumamos que el promedio de SNe que ocurren es de dos por galaxia por siglo, obligaba a los astrónomos a escanear al menos cientos, sino miles, de galaxias para poder encontrar y estudiar SNe de forma efectiva.

Por ello, hasta hace 30 años las explosiones de SNe eran eventos muy raros de detectar. Gracias al avance de la tecnología y nuevos métodos de observación, actualmente, se registra varios miles de estos eventos cada año. Esto ha permitido que hoy en día se cuente con un gran base de datos de mediciones de SNe. De esta manera se ha descubierto que las SNe tienen roles muy importantes en el universo. Un ejemplo de ello es la síntesis de muchos elementos de la tabla periódica, especialmente los más pesados que luego son distribuidos en el medio interestelar. Todos estos elementos se combinan con las nubes moleculares y proporcionan la materia prima a partir de la cual se forman las estrellas y los sistemas planetarios [30].

En particular, las SNe son de gran interés para los astrónomos por su uso como velas estándar, en estudios cosmológicos. Esto quiere decir que son cuerpos celestes de brillo intrínseco consistente y con una forma muy bien definida. Estos objetos permiten a los astrónomos medir la distancia a la que se encuentran respecto a nosotros con bastante precisión y por consiguiente deducir la distancia de las galaxias lejanas en las que se encuentran. De esta manera, no solo se han podido construir mapas estelares más precisos usando SNe, sino también se ha podido mostrar que la expansión cósmica se está acelerando que fue recompensada con el Premio Nobel de Física 2011 .

En esta tesis, se expone en el cap. 1 los objetivos general del presente documento. Posteriormente se muestran los conceptos que se deben tener presentes para la comprensión de

este documento en el cap. 2. En el cap. 3 se muestra los instrumentos y metodología que se empleo para la obtención de imágenes de las SNe. Finalmente, en el cap. 4 y 5 se muestran los resultandos y conclusiones que se obtuvieron en este documento.

I. Parte introductoria del trabajo

A. Objetivos del estudio

Se analizará datos fotométricos de explosiones de SNe obtenidos en el Observatorio Astronómico de la UNI (OAUNI) durante campañas observacionales de distintos años (2016, 2017 y 2023). El análisis incluirá, según sea el caso, evaluaciones de diagramas de diagnóstico en base a los colores registrados de las SNe. Además, se compararán los datos obtenidos en el OAUNI con datos disponibles en la literatura construyendo apropiadas curvas de luz. La construcción de estas curvas se realizará teniendo como referencia los *templates* que existen para las curvas de luz de las SNe en distintos filtros. Finalmente, al menos en un caso, se analizará en detalle datos multiépoca (11 noches) de una SN, y se calcularán parámetros asociados a la evolución física de la misma, tales como el parámetro de *stretch* y el parámetro de s_{BV} , así como su tasa de decaimiento $\Delta m_{15}(B)$.

1). Objetivo general

El objetivo general de este documento es realizar un estudio sobre el comportamiento de la curva de luz de las SNe observadas en el OAUNI para los filtros V , R y I , luego de su explosión y determinar así algunas propiedades de estos eventos.

2). Objetivos específicos

1. Realizar la reducción de las imágenes de las nueve SNe obtenidas por el OAUNI durante campañas observacionales de los años 2016, 2017 y 2023.
2. Determinar el valor de los colores $V-R$ y $R-I$ de las SNe AT 2015dd, 2016cvk y 2023gfo, y ubicarlas en sus correspondientes diagramas color-color determinando así el periodo de su vida en el que fue observada.

3. Comparar las magnitudes calibradas de las SNe AT 2016eqb, AT 2017erv, AT 2017eve, 2023ijd y 2023ixf con *templates* de una curva de luz de Nugent en los filtros *V* y *R* evaluando si los valores de la SN se ajustan al *template*.
4. Analizar la tasa de declino de la curva de luz de la SN 2017erp después de la explosión y realizar las correcciones respectivas a la curva de luz en el filtro *B* para convertirla en una vela padrón.
5. Analizar la ubicación de la SN 2017erp en el gráfico s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$.

B. Antecedentes

1). AT 2015dd

El evento astronómico AT 2015dd fue descubierto por el *MASTER-SAAO*² en el centro de la galaxia NGC5483 ($z=0.006$) el 15 de diciembre del 2015 [1]. Tres días después fue clasificada como una SN tipo Ib usando el espectroscopio *Goodman* del telescopio *SOAR*³, donde establecen como día del máximo de brillo el 8 de diciembre del 2015 [2]. El mismo día, el grupo *PESSTO*⁴ publicó un telegrama donde afirmaba que su análisis espectroscópico establecía como día de la explosión el mismo 18 [3]. Posteriormente, un análisis multibanda realizado por el telescopio de 51 cm de diámetro del *OAUNI* en Huancayo (Perú) mostró las magnitudes fotométricas preliminares en los filtros *V*, *R* e *I* [4]. Dada la posición de los colores *V-R* y *R-I* en el diagrama color-color, el tiempo que había transcurrido se encontraba entre 20 y 30 días desde el máximo de brillo. Este valor resultó siendo consistente el tiempo de la explosión indicado en [2].

²*Mobile Astronomical System of Telescope-Robots South African Astronomical Observatory*, sistema de auto detección.

³*Support Office For Aerogeophysical Research*, instalación de la Oficina de Programas Polares de la Fundación Nacional de Ciencias en Texas.

⁴*Public ESO Spectroscopic Survey for Transient Objects*, organización intergubernamental en Chile.

2). SN 2016cvk

La SN 2016cvk fue descubierta por el Dr. S. Parker en imágenes tomadas el 12 de junio del 2016 por el telescopio cuádruple de 14 cm *Cassius* en Cerro Tololo, Chile. La SN tuvo un brillo muy tenue, del orden de 17 mag aproximadamente en el filtro *V*, y se encontró al este de la galaxia hospedera ESO 344-G 021 ($z=0.010783$) [5]. Para poder clasificarla, el grupo *ASAS-SN*⁵ realizó observaciones desde mediados de junio hasta finales de agosto en *Las Campanas Observatory* usando el telescopio *du Pont* de 2.5m y el espectroscopio *WFCCD*. Se verificó un comportamiento muy similar al de una SN tipo *IIn* observada en anteriores años (SN 2009ip). Esto fue confirmado días después por el grupo *PESSTO* que clasificó este evento como una SN tipo *IIn* el 8 de setiembre del mismo año [6].

3). AT 2016eqb

La SN AT 2016eqb fue descubierta el 1 de agosto del 2016 en imágenes de la galaxia 2MASX J23154564-0120135 ($z=0.025308$) tomadas por el telescopio cuádruple *Cassius* en Chile del grupo *ASAS-SN* [7]. Fue clasificado como una SN *Ia* en un telegrama escrito el mismo día de su descubrimiento por el grupo *KOSMOS*⁶ luego de realizar observaciones espectroscópicas con el telescopio *KPNO Mayall* 4-m, donde establece el día 7 de agosto como el día de la explosión. El grupo *ASAS-SN* realizó observaciones durante cinco días en el filtro *V* anteriores a la explosión de este evento donde presentó una magnitud de ~ 16.5 [8]. Asimismo, se tiene registro de magnitudes preliminares de ~ 15.8 para esta SN en los filtros *R* y *V* por el *OAUNI* el día 9 de agosto del 2016 [9].

⁵*All-Sky Automated Survey for Supernovae*.

⁶El *Cosmic Evolution Survey (COSMOS)* es un estudio astronómico formado por más de 200 investigadores de todo el mundo.

4). SN 2017erp

La SN 2017erp fue descubierta por K. Itagaki en imágenes tomadas el 13 de junio del 2017 [10]. Fue clasificada como una SN la extremadamente joven luego de un análisis espectroscópico que se realizó por el *Southern African Large Telescope (SALT)* usando el espectroscopio Robert Stobie como parte del programa 2017-1-MLT-002 [11]. Fue localizada en el brazo de la galaxia NGC 5861, la cual presenta un *redshift*⁷ de 0.006174 ± 0.000003 [12]. En los últimos años esta SN ha sido punto de interés, pues se ha estudiado la relación entre el carácter no homogéneo de su composición y su curva de luz, así como el particular enrojecimiento que presentan sus líneas espectrales en el rango del ultravioleta cercano [13]. Debido a esto, diversos grupos y telescopios han reunido una amplia base de datos del brillo de esta SN en distintos filtros, que permitió estudiar el comportamiento de su curva de luz y obtener diversos parámetros inherentes a este. Un análisis sobre su velocidad de caída en el filtro *B* ($\Delta m_{15}(B)$) fue hecho por *Las Cumbres Observatory (LCO)*, presentando un valor de 1.05 ± 0.06 . Este dato discrepa ligeramente del valor encontrado por el *Ultra Violet and Optical Telescope (UVOT)* el cual fue 1.11 ± 0.02 [14]. Ambos son indicadores de la normalidad de la SN 2017erp debido a que se encuentran dentro del rango $1.0 \leq \Delta m_{15}(B) \leq 1.4$ establecido por [15]. Por otro lado, la curva de luz en el color *B-V* de este evento presentó un valor de 0.9864 ± 0.0001 para el parámetro *Stretch - Color* (s_{BV}). Este dato permitió saber que la forma de la curva de luz de esta SN era *standard* [14].

5). AT 2017erv

La SN AT 2017erv fue descubierta por el grupo *ASAS-SN* en imágenes tomadas el 13 de junio del 2017, en las instalaciones ya mencionadas de Chile [16]. En estas imágenes, la SN se encuentra al noreste de su galaxia hospedera AM 1904-844 ($z=0.017035$) donde presentaba

⁷ *Redshift* (z) es un término utilizado para describir situaciones en las que se observa que un objeto astronómico se aleja del observador, de modo que se observa que las características de emisión o absorción en el espectro del objeto se han desplazado hacia longitudes de onda más largas (rojas).

una magnitud absoluta ~ 18.5 en el filtro V . Luego de este descubrimiento, el grupo *ASAS-SN* realizó observaciones de este evento por un total de cuatro fechas previas al día de la explosión. Este último resultó ser el 24 del mismo mes, establecido en un telegrama publicado dos días antes por el *Siding Spring Observatory*. En este reporte también clasifican a esta SN como una tipo Ia luego de obtener su espectro con su telescopio *ANU* de 2.3m [17]. Posterior a esta fecha, el satélite *GAIA*⁸ registró datos fotométricos que corresponden a 6 fechas entre mediados de julio del 2017 hasta mediados de enero del año siguiente. A diferencia de los datos del grupo *ASAS-SN*, estos datos fueron obtenidos usando un filtro especial (G) cercano al V donde se puede apreciar la caída de la curva de luz de esta SN, cuando su brillo pasa de 16.61 mag a 20.22 mag.

6). **AT 2017eve**

La SN AT 2017eve fue descubierta en las mismas imágenes que tomó el telescopio *Cassius* del grupo *ASAS-SN* en Chile el 13 de junio del 2017. Esto ocurrió el 19 de junio del 2017, 6 días después del descubrimiento de la SN AT 2017erv, cuando observaban la galaxia GALEXASC J184352.21-562927.7 ($z=0.031$) en la que se encontraba esta SN [16]. En el telegrama escrito por [17] también se clasifica a esta SN como una SN tipo Ia de manera análoga a como se clasificó la SN AT 2017erv. Al encontrarse en las imágenes tomadas por el mismo telescopio, el grupo *ASAS-SN* pudo obtener datos de su brillo en el filtro V también para cuatro fechas previas a la explosión de esta SN. Por otro lado, el satélite *GAIA* obtuvo imágenes de este evento en ocho fechas distintas en el filtro G luego de la explosión. En estas imágenes se registró como el brillo de la SN AT 2017eve decae desde 18.45 mag hasta 20.59 mag. A pesar de ello, como el periodo de observación del satélite *GAIA* fue al comienzo y al final de esta caída, la forma que presentó la curva de luz de SN AT 2017eve no es muy clara.

⁸sonda espacial perteneciente a la Agencia Espacial Europea.

7). SN 2023gfo

La SN 2023gfo fue descubierta por el sistema *ATLAS*⁹ el 19 de abril del 2023 mientras presentaba una magnitud de 16.24 en el filtro *orange-ATLAS*. Esta medida fue tomada por su telescopio cuádruple de 0.5 m mientras la SN se encontraba al suroeste de su galaxia hospedera NGC 4995 ($z = 0.0058$). Asimismo, el sistema *ATLAS* realizó observaciones sobre el mismo campo cuatro días antes sin encontrar evidencia de la SN. Este suceso podría indicar que la SN se encontraría en su fase de crecimiento [18]. Por otro lado, un día después de su descubrimiento, el *Lick Observatory* realizó observaciones espectroscópicas con su espectrógrafo Kast doble en su telescopio *Shane* de 3 m. De estas observaciones se encontró que el espectro de esta SN coincidía significante mente con una SN tipo IIP anteriormente observada (SN1999gi) [19].

8). SN 2023ijd

La SN 2023ijd aparece por primera vez en un reporte publicado por el Profesor Krzysztof Stanek del grupo *ASAS-SN* el día 14 de Mayo del 2023. Sin previa evidencia de su existencia, fue descubierta cuando se observaba a su galaxia hospedera NGC 4568 ($z=0.007446$) con el telescopio *ASASSN-Cassius* [20]. Este evento fue clasificado el día siguiente como una SN II por el Dr. Daniel Perley del grupo *ZTF*¹⁰ al encontrar que su espectro presentaba las características líneas espectrales de una SN tipo II. El análisis espectral fue realizado con el espectrógrafo *SPRAT* (*Spectrograph for the Rapid Acquisition of Transients*) del telescopio de la universidad de Liverpool, Reino Unido [21].

⁹*Asteroid Terrestrial-Impact Last Alert System*

¹⁰La *Zwicky Transient Facility* (*ZTF*) es una asociación público-privada cuyo objetivo es un estudio sistemático del cielo nocturno óptico.

9). SN 2023ixf

En un reporte publicado el 19 de Mayo del 2023, se describe el descubrimiento de esta SN por K. Itagaki. Este descubrimiento fue realizado cuando se observaba su galaxia hospedera M101 ($z=0.000804$) [22]. En otro reporte publicado 2 horas después, se clasificó a este evento como una SN tipo II por presentar líneas espectrales similares a este tipo de SN en su etapas tempranas de vida. Esta clasificación fue realizada por el mismo espectrógrafo que se usó con la SN 2023gfo. En este reporte también se nombró a esta SN como la tipo II más cercana que se ha encontrado en las últimas décadas. Eso se afirma debido a que la SN 2023ixf se encuentra a una distancia de 6.4 Mpc aproximadamente [23]. Posterior al día del descubrimiento se siguió presentando reportes de observaciones previas que limitaban la fecha de explosión de la SN. En uno de ellos, se presenta la no detección de la SN 2023ixf el 18 de mayo (10:17:15 UT) [24] lo que junto a la publicación de detección el día siguiente (2023-05-19 06:08:00 UT)[25] situaba a la época de la explosión en un intervalo de 20 horas aprox. entre el 18 y 19 de mayo. Asimismo, cabe mencionar que han habido detecciones de una estrella progenitora encontrando como posible candidata a una supergigante roja debido a evidencia encontrada a partir de datos en el rango visual e infrarrojo [26]. Finalmente, a partir de los datos recaudados por observatorios europeos se realizó una publicación donde se indicaba que la SN 2023ixf podría ser una tipo II-L [27].

II. Marco teórico y conceptual

A. Marco teórico

1). Supernovas

La inmensidad del espacio que rodea nuestro planeta es un lugar que alberga distintos tipos de eventos, algunos tan pequeños que pasan desapercibidos y otros en cambio tan grandes que pueden ser observadas desde distintas galaxias. Un claro ejemplo de estos últimos son las SNe, remanentes de explosiones estelares de carácter cataclísmico, extremadamente energéticas y que hacen desaparecer la estrella progenitora. Esto ocurre así, pues en la etapa final de la evolución de su estrella progenitora, su luminosidad aumenta muchas veces, hasta 100 millones de veces en unos pocos días siendo comparable con la luminosidad de una galaxia. Después de alcanzar su valor máximo, la luminosidad disminuye lentamente durante un intervalo de tiempo prolongado, siendo el remanente resultante de la explosión visible como una nebulosa. Se encuentra comúnmente en los extremos de las galaxias, sin embargo, las SNe son eventos extremadamente raros, que generalmente ocurren aproximadamente una vez cada cien años en cualquier galaxia. A pesar de esto al ser objetos astronómicos muy bien definidos, pueden ser usados como referencia para determinar distancias de otros cuerpos celestes, como galaxias y estrellas [30].

2). Clasificación

La primera explicación física para las SNe fue propuesta por Baade & Zwicky en 1934 [28] quienes sugirieron que la energía de la SN proviene del colapso de una estrella normal en una estrella de neutrones¹¹. Esta idea era correcta cuando se hablaba de la muerte de una estrella masiva, pero no para todos los tipos de SNe. Ya en la década de 1940, Minkowski notó que los espectros de las SNe indicaban al menos dos tipos diferentes de objetos. Un grupo, llamado

¹¹Es un remanente estelar que se forma cuando estrellas gigantes (de 1.5 a 5 masas solares) agotan su combustible y colapsan sobre sí mismas.

Tipo I, caracterizado por la ausencia de hidrógeno en su espectro, mientras que el otro grupo, llamado Tipo II, mostrando fuertes líneas de hidrógeno que dominan el espectro.

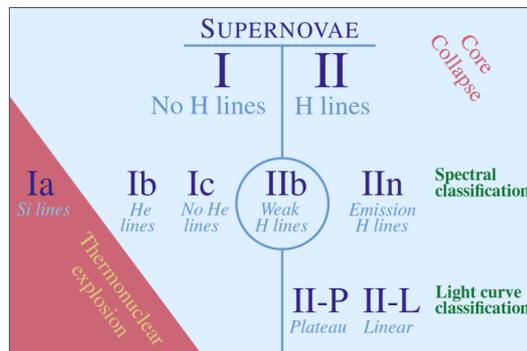


Figura I: Clasificación de las SNe [29].

Desde ese tiempo, la cantidad de información espectroscópica se incrementó sustancialmente, así como también nuestro conocimiento sobre estos objetos. Así, a mediados de la década de los 80 se realizó una sub clasificación de las SNe de tipo I dependiendo si estaba presente o no la línea de Si II λ 6100A [30]. Si esta línea estaba presente, la SN era clasificada como Tipo Ia, si no lo estaba era designada como Tipo Ib o Ic, como se muestra en la figura I.

3). SN Tipo Ia

En este trabajo nos centraremos en cuatro tipos de SNe. El primer tipo que consideraremos serán las SNe Ia que resultan de explosiones de enanas blancas empujadas por encima de la masa límite de Chandrasekhar (~ 1.4 masas solares). Sin embargo, el cómo se origina esta explosión realmente resulta difícil de comprobar. El modelo teórico más aceptado es el de un sistema binario de estrellas, de las cuales por lo menos una es una enana blanca como se muestra en la figura II. Debido a que nunca ha sido detectado directamente, no está confirmado qué tipos de sistemas estelares producen SNe Ia.

Por ello, los modelos que se tienen resultan de restringir los sistemas progenitores y los mecanismos de explosión de SNe Ia. Como resultado de esto tenemos dos escenarios más probables, el modelo únicamente degenerado y el modelo doblemente degenerado.

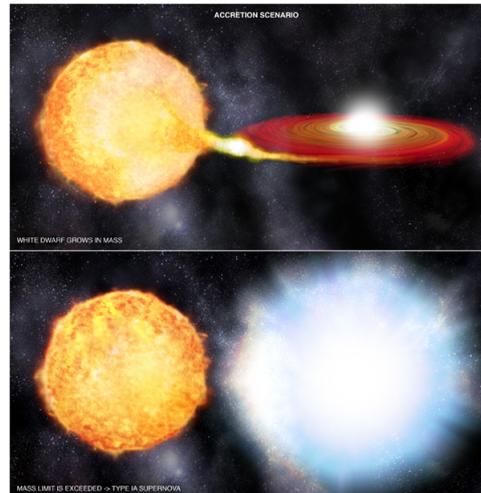


Figura II: Explosión de una enana blanca debido a que sobrepasa el límite de Chandrasekhar.

En el primer escenario, una enana blanca primaria acumula materia de una estrella compañera no degenerada hasta que se acerca al límite de masa de Chandrasekhar y explota. Mientras que en el otro escenario tenemos un sistema binario donde ambas estrellas son enanas blancas, este arreglo termina en una explosión de la estrella menos masiva (y por lo tanto con mayor radio). De esta manera la estrella primaria estaría aumentando su masa con el material que proviene de la otra enana blanca hasta alcanzar el límite de Chandrasekhar [31]. Un dato interesante del segundo escenario, es que resulta debido a que el modelo de predicción de SNe no predecía correctamente todas las SNe que encontrábamos en el universo cuando solo se consideraba el primer escenario.

4). SN Tipo Ib

El segundo tipo de SN del que se tiene datos y que fue observado por el OAUNI es la tipo Ib. Como se muestra en la figura I, esta SN cae en la clasificación de tipo I porque tampoco presenta líneas de H en su espectro. Sin embargo, estas se diferencian de las SNe Ia y de cualquier otra SN por presentar líneas de He, por lo que al encontrar estas líneas en un análisis espectral es suficiente evidencia para clasificar el evento como una tipo Ib [30].

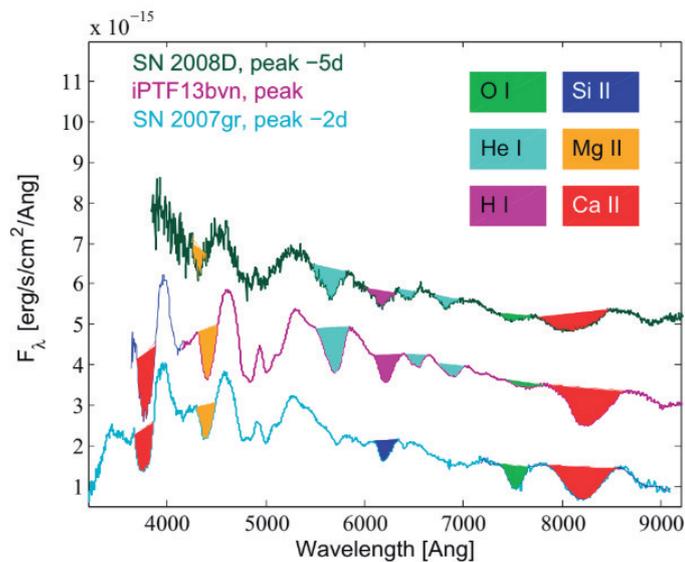


Figura III: Comparación de las líneas espectrales de dos SNe tipo Ib : SN 2008D (línea verde) y iPTF13bvn (línea morada); y otra SN tipo I : SN2007gr (línea celeste) [30].

De la figura III se puede confirmar como las SNe SN 2008D y iPTF13bvn presentan unas notorias líneas de He I en sus respectivos espectros. Mientras que la SN 2007gr al no ser tipo Ib carece de elemento, a pesar de que las tres SNe comparten líneas espectrales de Mg II y Ca II.

Otro aspecto a resaltar de las SNe Ib es su origen, ya que estas explosiones suelen ocurrir a a partir de estrellas masivas. Además que su proceso de extinción cambia, pues si las SNe Ia ocurrían debido a una explosión termonuclear entonces las tipo Ib se extinguían por un colapso de su núcleo (*core-collapse*, en inglés). Este dato es de suma importancia, pues es una característica que comparte las SN Ib con el resto de tipos de SNe.

5). SN Tipo IIa

El otro tipo de SNe que analizaremos será del tipo IIa, definidas ampliamente como SNe que exhiben líneas de Balmer de H brillantes y estrechas en sus espectros. El componente estrecho de estas líneas es producido por gas circunestelar (CS), ionizado cuando la onda de choque estalla fuera de la estrella por el destello ultravioleta que lo acompaña. Los componentes intermedio y ancho son producidos por eyecciones de SNe impactadas a alta velocidad, que resulta de la colisión de las eyecciones con el gas CS. Por otro lado, estas SNe fueron reconocidas como una clase distinta de objetos relativamente tarde en comparación con otros subtipos de SN.

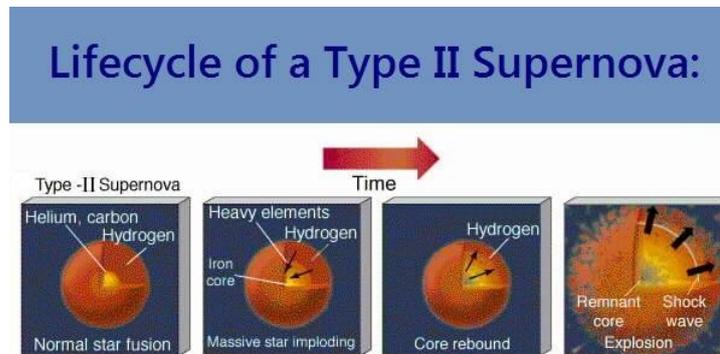


Figura IV: Ciclo de vida de una SN Tipo IIa (<https://www.adamfrankscience.com/>).

Puede ser difícil diferenciar entre una SN IIa que surge del colapso del núcleo de una estrella azul luminosa muy masiva o una estrella similar y una explosión termonuclear de una enana blanca con material CS denso. Esto se debe a que las SNe IIa puede surgir en cualquier momento en que haya material denso rico en H y algo de Ni alrededor de una estrella que explote, lo que podría suceder de diferentes maneras [30]. La imagen física detallada y la evolución temporal de las SNe IIa se muestra en la figura IV. En ella se ve como los elementos en su núcleo se vuelven cada vez más pesados.

En general, se acepta que observamos un SN tipo IIn cuando las SNe interactúan con el material denso que rodea a la estrella, ya que en estos casos la luz que vemos no proviene de la SN en sí, sino de la interacción previamente descrita. Esta interacción resulta de gran interés pues, aunque no ocurra en las primeras semanas de vida de un SN, puede ocurrir en las siguientes semanas. Un claro ejemplo de esto es la SN 2002ic, cuya clasificación espectral durante las primeras semanas mostró que se trataba claramente de una SN tipo Ia, pero durante las siguientes semanas el espectro de la SN 2002ic evolucionó hacia el de una SN IIn. Esto implica que las SN tipo IIn no son necesariamente SN tipo II en absoluto, y que al menos alguna fracción puede resultar de la interacción de SNe tipo Ia con su entorno [30].

Hay otras dos SN tipo IIn bien estudiadas que muestran una evolución espectral y fotométrica casi idéntica en épocas tardías como lo hizo la SN 2002ic, lo que indica que quizás estos también eran SN Ia. Por otro lado, otros SN tipo IIn bien estudiados muestran características diferentes, y podría ser que estos objetos estén asociados con SNe de colapso del núcleo. Sin embargo, aunque esto explicaría por qué solo algunos SN IIn son emisores de radio y otros no, la validez de la subclase IIn aún está en terreno inestable y se necesitan muchas más observaciones antes de que los astrónomos puedan decidir de una vez por todas si estos objetos deben tener su propia clasificación [30].

6). SN Tipo IIp

Ya hemos hablado de un tipo de SN tipo II y como lo hemos clasificado por las líneas que presenta en su espectro. Sin embargo existen otros factores que nos pueden resultar útiles a la hora de diferenciar una SN de otra, una de ellas es la curva luz que generan luego de la fecha del máximo de brillo. Basándonos en este hecho las SNe tipo II se dividen en SNe IIp y II-L, en particular nos centraremos en este documento en las tipo IIp.

Primero, es necesario mencionar que lo que caracteriza a estas SNe es el *plateau* (meseta, en español) que tienen sus curvas de luz y que es de donde proviene el sufijo *p* en el nombre de su clasificación. Ya que como se puede ver en la figura V, en lugar de presentar una caída con una pendiente constante, presentan un *plateau* luego del máximo de brillo.

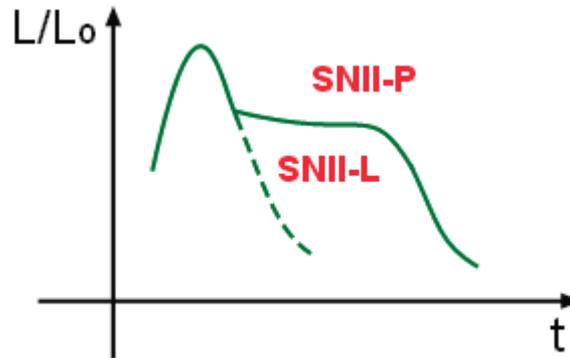


Figura V: En el figura se muestran dos tipos de SNe: la Sn tipo IIp y la SN II-L (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SNIIcurva.png>).

Este *plateau* resulta de sumo interés pues suele aparecer entre las primeras decenas de días hasta fechas que superan los 100 días [30]. Por lo tanto, más que una característica visual en la curva de luz de una SN tipo II, cobra suma importancia a la hora de clasificar estos eventos. Pues fuerza a los astrónomos a continuar con el seguimiento de estos eventos con la finalidad de confirmar la clasificación que se le pudo dar en los primeros días. Por otro lado, las estrellas que suelen dar origen a estos eventos suelen ser las supergigantes rojas. Y es que son estas estrellas las responsables del *plateau* de las SNe IIp, pues un aspecto propio de las supergigantes rojas son las capas de H que presentan en su envoltura y que originan la curva característica de las IIp [30].

7). Curva de luz de SN Ia

Las curvas de luz óptica de la mayoría de los SNe Ia son muy homogéneas, siguiendo una evolución similar con el tiempo. Un avance clave fue el descubrimiento de una relación empírica entre la luminosidad de una SN Ia en el brillo máximo y el ancho de la curva de luz.

Las SNe la más luminosas tienen curvas de luz más amplias, mientras que las SNe la más tenues tienen curvas más estrechas. Esto se cuantificó primero midiendo la diferencia en la magnitud en la banda B de un SN la con su máximo de brillo y 15 días después [32].

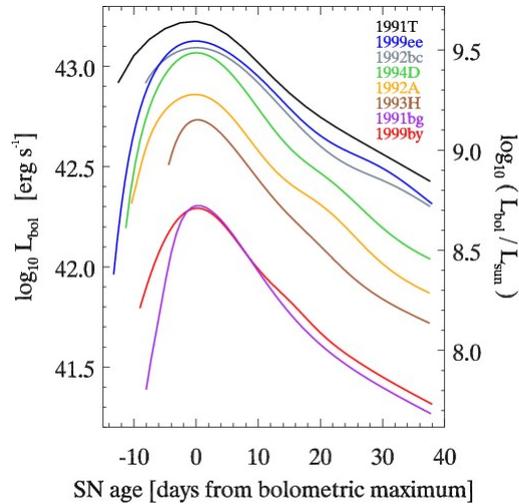


Figura VI: Curvas de luz características para distintas explosiones de SNe [33].

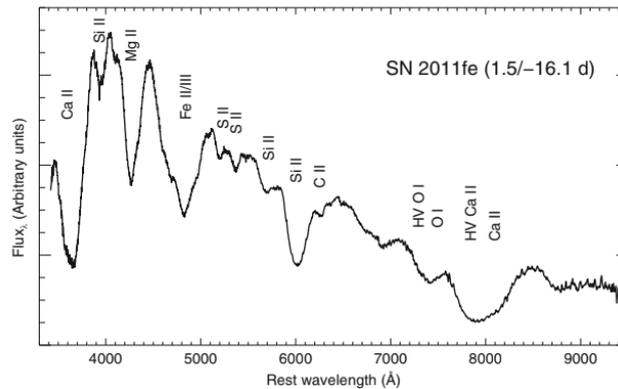


Figura VII: Gráfica de las características espectrales de una SN la típica, evaluada a -16.1 días de la explosión hasta 1.5 días luego del máximo de brillo [30].

La amplitud (ancho) de la curva de luz está determinada principalmente por el tiempo de difusión (cuánto tardan los fotones en escapar de la eyección), que depende tanto de la cantidad de material del grupo Fe producido en la explosión como de la temperatura del medio que los eyecta. Por ejemplo, de la figura VI se puede inferir que las SNe la que producen más elementos del grupo Fe tienen opacidades¹² más altas y tiempos de difusión¹³ más largos y, por lo tanto, mantienen la curva de luz más brillante durante más tiempo, lo que da como resultado

¹²Propiedad óptica de la materia que impide el paso de una proporción apreciable de la luz.

¹³Dispersión de la luz que ocurre al entrar en contacto con un material.

un pico más amplio [33].

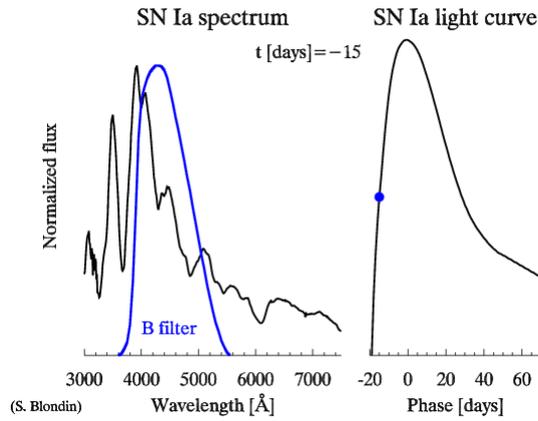


Figura VIII: Gráficos comparativos del brillo de una SN con su espectro para fechas antes del máximo de brillo [34].

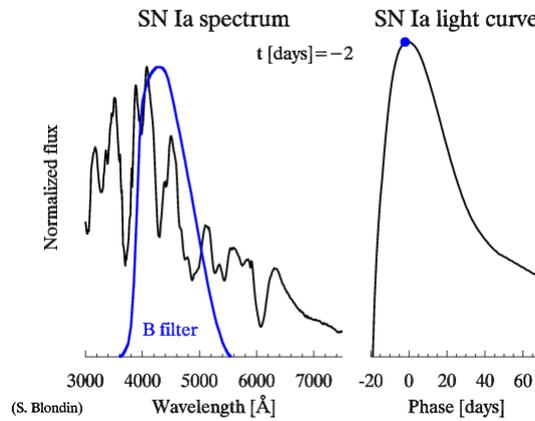


Figura IX: Gráficos comparativos del brillo de una SN con su espectro para fechas durante el máximo de brillo [34].

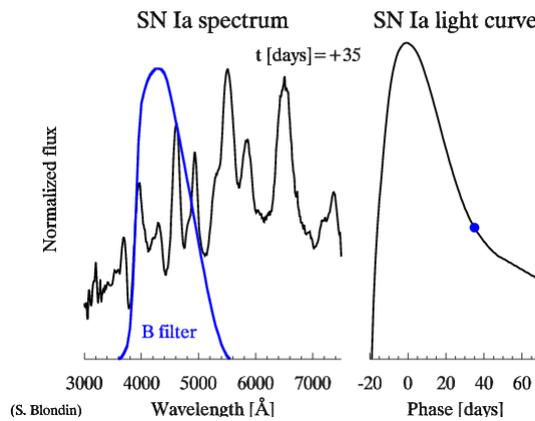


Figura X: Gráficos comparativos del brillo de una SN con su espectro para fechas posteriores al máximo de brillo [34].

Las diferencias de temperatura también afectan el ancho de la curva de luz. A medida que la temperatura de la eyección cae después de la luz máxima, los elementos eyectados se vuelven a combinar con especies doble o simplemente ionizadas, y las características de absorción de Fe II / Co II se vuelven importantes, particularmente en la banda B donde absorben fuertemente [33]. Esto se puede evidenciar cuando comparamos la intensidad de las líneas espectrales mostradas en la figura VII con las figuras VIII, IX y X, donde podemos ver como las líneas espectrales de una SN la varía su intensidad conforme varía su curva de luz. Al inicio presenta un color mas azulado y luego sufre un enrojecimiento hasta el final de su vida.

Dado que las SNe la menos luminosas tienen, en promedio, temperaturas más frías, la transición a Fe II / Co II ocurre antes en estas SNe la. Esto da como resultado una redistribución más rápida del flujo a longitudes de onda más largas en menos luminosa SNe la y, por lo tanto, una disminución más rápida de la banda B después de la explosión. Además de la relación de ancho-luminosidad observada, se identificó una correlación entre la luminosidad de la banda B y el color $B-V^{14}$ medido a la luz máxima. Los SNe más brillantes, en promedio, tienen colores más azules. El tamaño de esta correlación es mayor que la relación ancho-luminosidad y es la corrección dominante aplicada para disminuir la dispersión de las curvas de luz SN la para cosmología [30].

8). Curva de luz de SN IIn

Una de las características más importantes cuando se habla de SNe tipo IIn es que producen las curvas de luz más luminosas de todos los eventos ricos en H. Esto se explica por la luminosidad adicional generada por la interacción del material CS . Además, los tipos IIn también muestran el rango más amplio de luminosidades (llegan a abarcar aproximadamente hasta seis magnitudes) y formas de curvas de luz (figura XI) de todos las SNe ricas en H. Esta diversidad se atribuye a la diversidad y posiblemente a la asimetría en la estructura de

¹⁴Diferencia de las magnitudes aparente de de la banda B y la banda V

densidad y la masa del material CS anterior a la explosión.

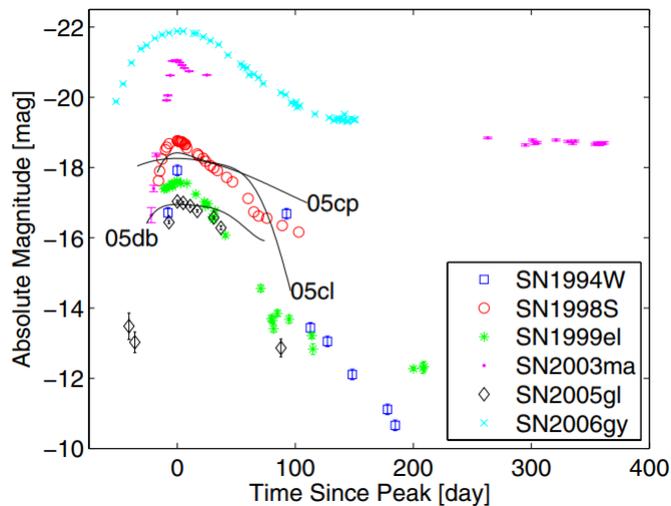


Figura XI: Curvas de luz en el filtro *R* de SNe II_n provistas por el *CALTECH CORE-COLLAPSE PROJECT (CCCP)*. La figura presenta distintas SNe II_n para los que la fotometría cubre el periodo correspondiente al máximo de brillo [35].

Asimismo, la luminosidad y la forma de la curva de luz contienen información sobre el material CS que se puede rastrear hasta el historial de pérdida de masa del progenitor antes de explotar [35]. Un hecho interesante que afectan estas curvas es que muchos progenitores de Tipo II_n se iluminan significativamente antes de la explosión, en los llamados eventos precursores de SNe. Tales precursores son comunes para SNe tipo II_n ya que más del 50% de ellos tienen al menos un estallido previo a la explosión más brillante dentro de los 4 meses anteriores a la explosión [30]. Estos precursores se interpretan como eyecciones violentas de varias masas solares de material posiblemente debido a inestabilidades previas a la explosión en el interior de la estrella. Debido a esto, la gran diversidad en las curvas de luz probablemente esté relacionada con la gran diversidad en la masa de material CS y la estructura de densidad que rodea a los progenitores de SNe de tipo II_n [35].

9). Curva de luz de SN IIp

Cuando se habla de la curva de luz de una SN tipo II, siempre se van a mencionar las sub clase IIp y II-L (otro tipo de SN tipo II). Ya que son las únicas dos subclases de SNe que obtienen sus nombres por la forma de su curva de luz. Estos eventos como ya se mencionó son los tipos IIp y los II-L, donde los más comunes que se suelen encontrar son los primeros [30].

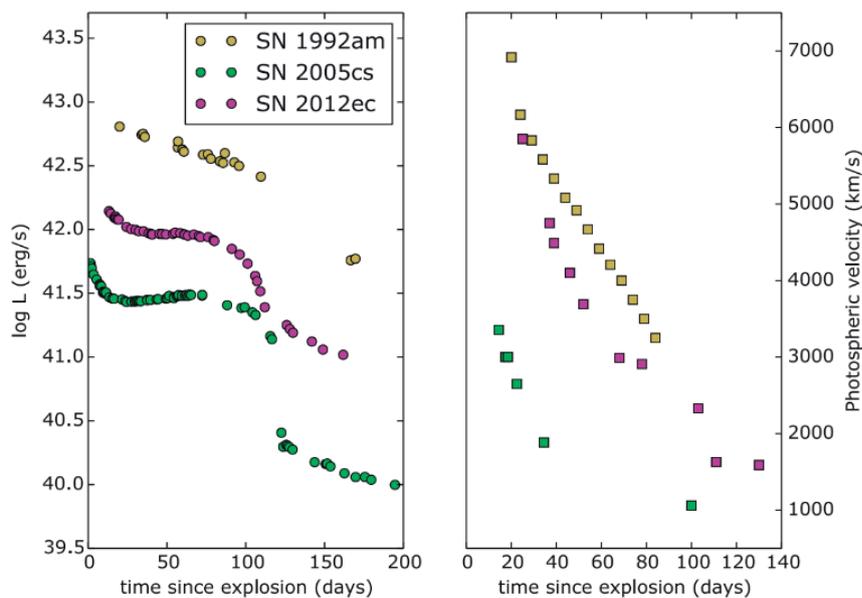


Figura XII: Curvas de luz históricas de SNe IIp en un grafico Log(L) vs. tiempo [30]. Se presentan los datos de tres eventos bien estudiados: la SN 1992 (puntos amarillos), SN 2005 (puntos verdes) y SN 2012 (puntos morados) [30].

Las SNe tipo IIp en general alcanzan brillos similares cuando llegan al máximo en su curva de luz. Sin embargo, presentan una gran variedad de formas en el periodo posterior, esto se traduce como distintas velocidades de caída, el tiempo previo que pasa antes de entrar en la fase de *plateau* y lo pronunciado que este puede ser. Por eso, en la figura XII se muestran tres SN del mismo tipo pero de aproximadamente tres décadas distintas. En ella se puede apreciar como el *plateau* de estas SNe se presenta de manera distinta en cada una. Además de estos casos se tiene evidencia de otra SN muy peculiar, la SN 1987 A [36].

Esta SN fue de gran interés debido a que durante los primeros 300 días, posterior a la explosión, presentaba un comportamiento típico de una SN tipo II. Sin embargo fue a medida que se acercaba a los 400 días en donde su pendiente comenzó a variar y caer rápidamente, lo que podría indicar que se trataba de una SN IIp al generar esa curva que los caracteriza. Lo interesante fue, que su *plateau* solo se podía apreciar en el filtro U, más no en el resto (*R*, *I*, *V* y *B*) como se muestra en la figura XIII.

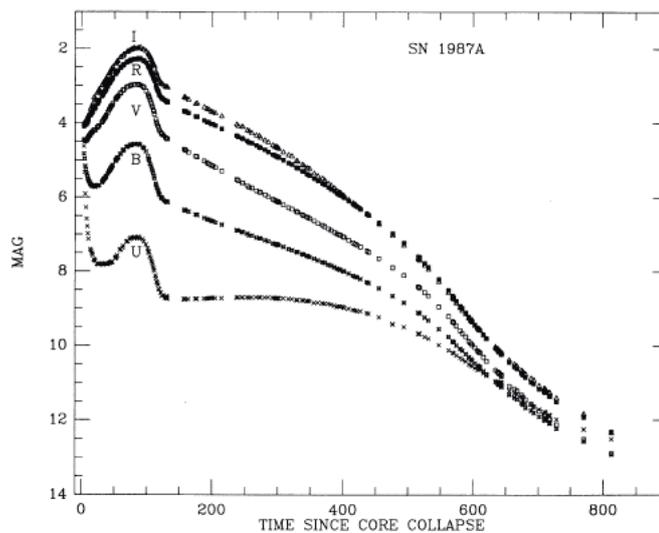


Figura XIII: Curva de luz de la SN 1987A en los filtros *U*, *R*, *I*, *V* y *B* [36].

10). Parámetro $\Delta m_{15}(B)$

Como ya se mencionó en el apartado anterior algunas SN tipo Ia presentan, luego de la explosión, una velocidad de caída más rápida en su curva de luz que otras. Este parámetro fue investigado en primera instancia por el astrofísico Pavlovich Pskovskii en 1977, que buscó determinar la velocidad de caída promedio (β). Pskovskii definió su parámetro (β) como la transición de la curva de luz en su máximo de brillo hasta el punto en que la velocidad de caída es menor en la banda B. Posteriormente, este parámetro fue redefinido, por el astrofísico Mark M. Phillips [32], como la diferencia de magnitudes, en la misma banda, entre el máximo y su valor luego de 15 días ($\Delta m_{15}(B)$). De esta manera, como se observa en la figura XIV, Phillips encontró que las SNe Ia más débiles (brillantes) mostraban una velocidad más rápida (lenta).

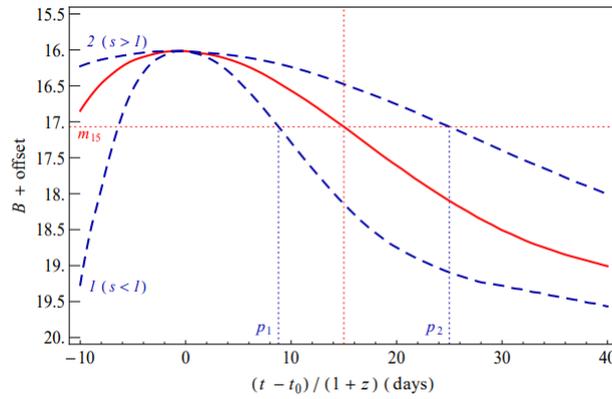


Figura XIV: Gráfico brillo (filtro B) vs. tiempo corregido, el tiempo corregido se determinó en base al máximo de la curva de luz y el parámetro de *redshift*. En la gráfica se muestra una curva de luz teórica (rojo) y 2 curvas con velocidad de caída rápida ($s < 1$) y velocidad de caída lenta ($s > 1$) [37].

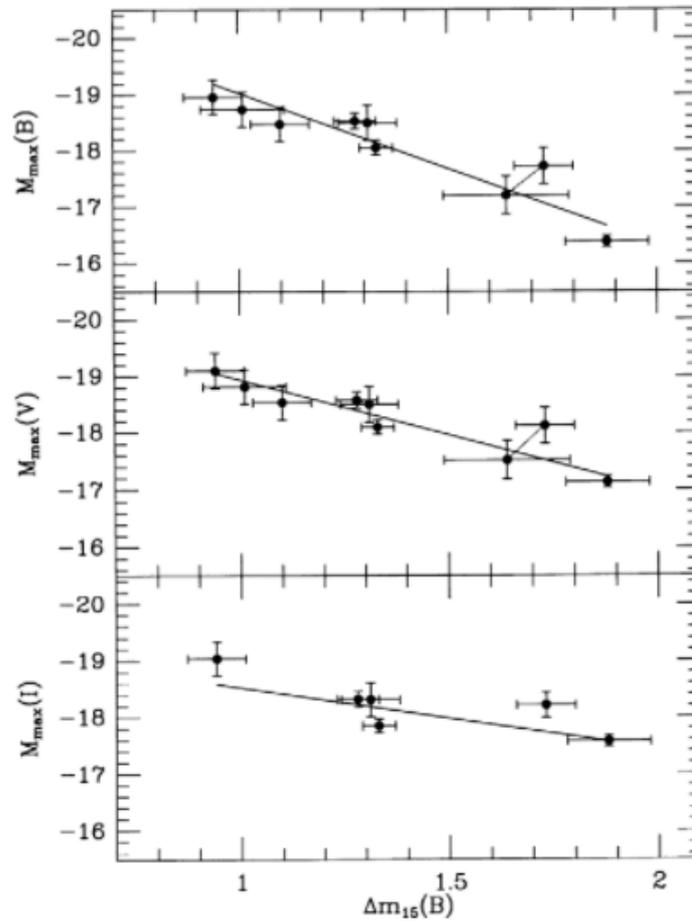


Figura XV: Gráficas M_{max} vs. $\Delta m_{15}(B)$ para 9 SNe Ia en los filtros B, V y I junto a sus aproximaciones lineales para valores entre 0.7 y 2.1 de $\Delta m_{15}(B)$ [32].

Phillips también determinó el parámetro ($\Delta m_{15}(B)$) de 9 SNe, en las mejores condiciones de observación, con la finalidad de estudiar la relación entre este parámetro y las magnitudes

absolutas máximas¹⁵(M_{max}) de estas SNe. De esta manera, construyó las gráficas de la figura XV, encontrando que la M_{max} , para todas sus longitudes de onda de las SNe, era inversamente proporcional a su parámetro $\Delta m_{15}(B)$ [32]. La aproximación de Phillips para la M_{max} en los filtros B, V y I se muestran debajo.

$$M_{max}(B) = -21,726(0,498) + 2,698(0,359) \times \Delta m_{15}(B) \quad (1)$$

$$M_{max}(V) = -20,883(0,417) + 1,949(0,292) \times \Delta m_{15}(B) \quad (2)$$

$$M_{max}(I) = -19,591(0,415) + 1,076(0,273) \times \Delta m_{15}(B) \quad (3)$$

Además, pudo evidenciar que estas rectas disminuían sus pendientes para filtros correspondientes a longitudes de onda mayores. Este hecho mostraba que el efecto de la extinción estelar¹⁶ sobre el brillo de la SN disminuía a medida aumentaba la longitud de onda del brillo.

11). Parámetro de *stretch* (s)

El parámetro $\Delta m_{15}(B)$ es una herramienta muy útil cuando se busca caracterizar una SN Ia. Sin embargo para medir este parámetro es necesario observar la SN en fechas antes de su máximo hasta 15 días después de este. Con esto en mente, se desarrollaron plantillas de curvas de luz para eliminar esta problemática a partir de SNe tipo Ia con una observación de muy alta calidad. De esta manera, se crea el parámetro de *stretch*, que relaciona la anchura de la curva de una SN con su velocidad de caída. Para obtener este parámetro se usa una curva modelo al cual se le asigna un valor de $s = 1$. Así, una curva de luz con velocidad de caída mas lenta (rápida) tendrá un valor de $s > 1$ ($s < 1$) [37].

Es necesario realizar la corrección de la curva de luz con respecto a su parámetro de *redshift* y hacer coincidir el pico de la curva con el eje de coordenadas. Esto se realiza con

¹⁵Magnitud aparente de una SN, medida a una distancia de 10 pc, en su fecha de explosión.

¹⁶disminución de la intensidad luminosa debido a la absorción y dispersión por el polvo interestelar.

la finalidad de normalizar la curva, lo cual permite compararla con la plantilla. Para medir el parámetro s primero se halla la magnitud en el día 15 que tiene la curva modelo. Luego trazando una recta, paralela al eje temporal encontramos una magnitud p en la curva de luz de nuestra SN. Finalmente se halla el día al que le corresponde p en la curva de luz. De esta manera el parámetro de *stretch* esta dado por la ec. 4.

$$s = \frac{p}{15} \quad (4)$$

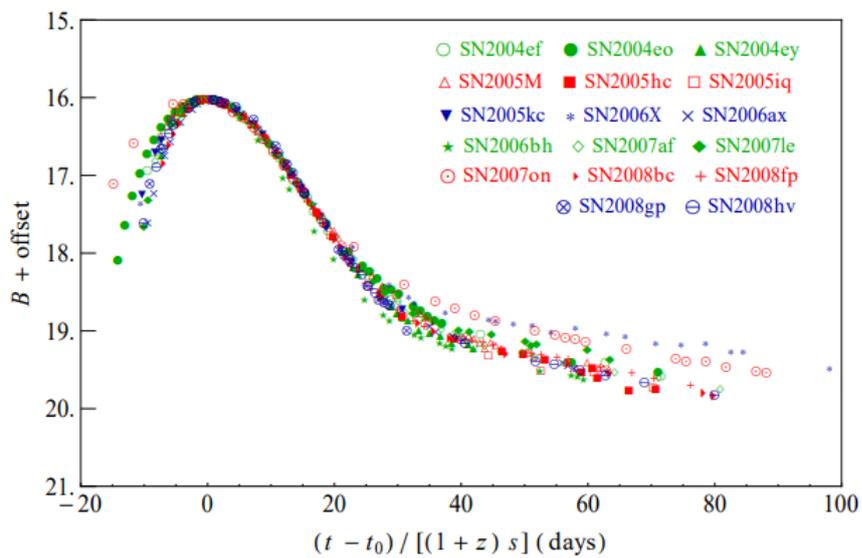


Figura XVI: Gráfico que muestra diferentes curvas de luz estandarizadas. Como se muestra en el gráfico la estandarización tiene un mayor efecto hasta 15 días posteriores luego del máximo [37].

El determinar el parámetro de *stretch* permite estandarizar las SNe como se muestra en la figura XVI. La estandarización de las SNe permite establecerlas como velas patrón que se emplean al hacer mediciones en todo el universo.

12). Parámetro de *Stretch-Color* (s_{BV})

Como ya se ha mencionado, el parámetro $\Delta m_{15}(B)$ resulta ser una herramienta muy útil cuando se busca caracterizar una SN Ia. Sin embargo, para velocidades de caída con $\Delta m_{15}(B)$ mayores a 1.7, este parámetro no caracteriza a una SN de manera eficaz. Para estos casos, una alternativa que nos ayuda de igual manera a determinar que tipos de SN Ia estamos analizando, es el parámetro de *Stretch-Color* (s_{BV}), un factor adimensional y que se expresa como:

$$s_{BV} = \frac{t_{(B-V)max}}{30} \quad (5)$$

Ya que como se muestra en [38], el color B-V está relacionado con la velocidad de caída de las SNe. Estos autores encontraron que cuando se usaba s_{BV} en lugar de $\Delta m_{15}(B)$, las SNe Ia con caídas más rápidas dejaban de comportarse como SNe anómalas (no se pueden categorizar) y más como SNe Ia normales.

Otro punto a resaltar del parámetro s_{BV} , es que no mide directamente la velocidad de caída como $\Delta m_{15}(B)$, ya que como se muestra en la figura XVII, lo que este parámetro mide es la diferencia, en el color *B-V*, entre el día 30 y el día donde la SN alcanza su máximo de color. De esta figura también se alcanza a notar que, aún cuando la SN alcanza su máximo de color en fechas posteriores al día 30, el valor de s_{BV} permanece siempre positivo, pero mayor a 1 [38].

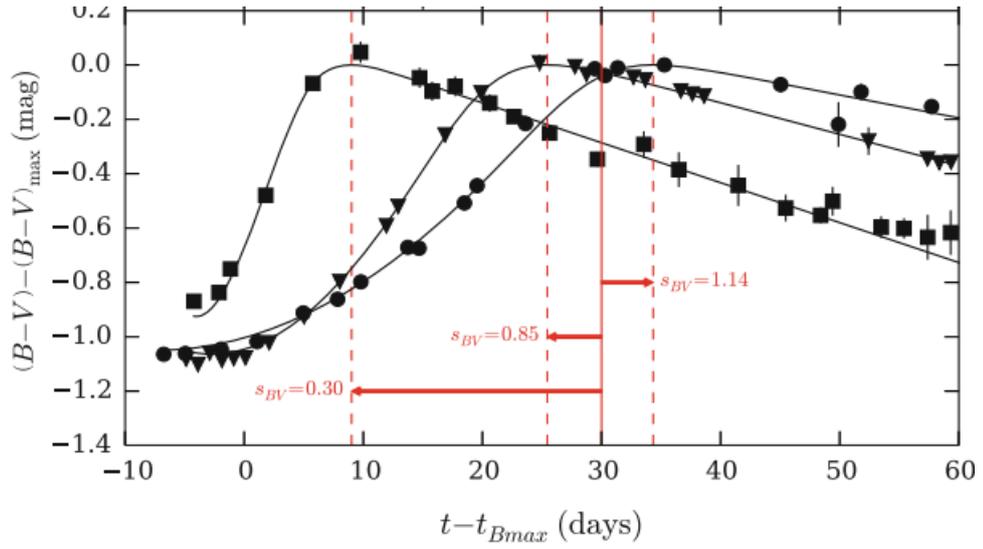


Figura XVII: Ilustración de la medición de s_{BV} para 3 diferentes SNe Ia en una gráfica $(B - V) - (B - V)_{max}$ vs. $t - t_{max}$ normalizada para un valor máximo de $(B - V)$ en la coordenada longitudinal (0.0). En esta gráfica las líneas rojas punteadas representan las fechas donde las SNe alcanzan sus máximos de color y la línea roja sólida el día 30 [30].

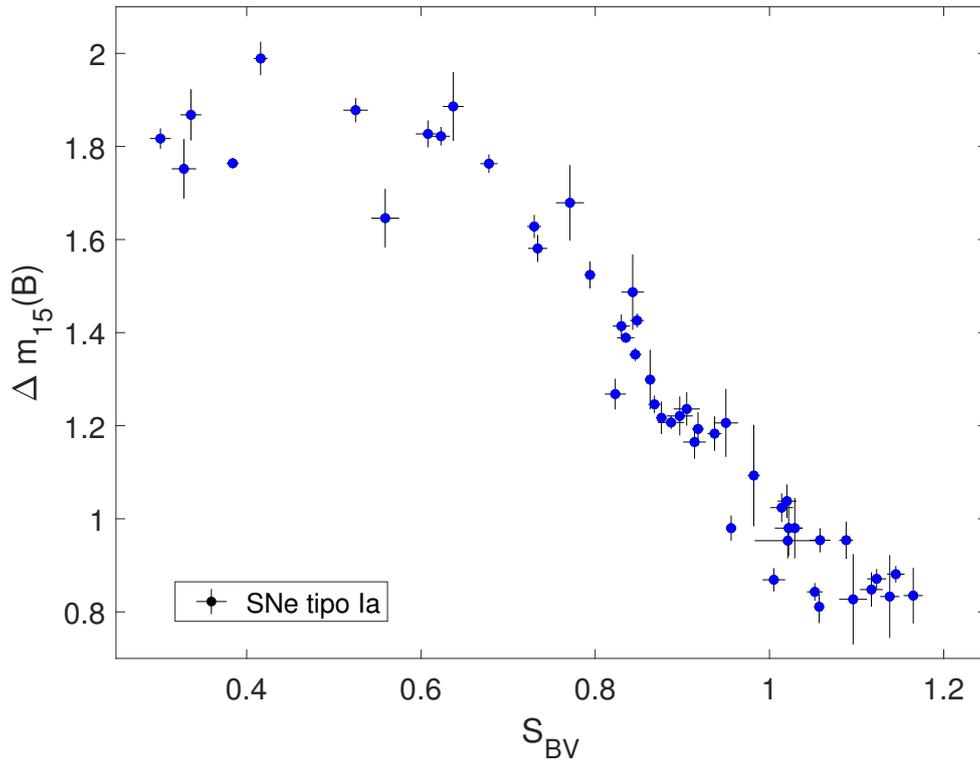


Figura XVIII: s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$ de SNe tipo Ia [39].

Por otro lado, la importancia de este parámetro, además de ser una alternativa a $\Delta m_{15}(B)$, recae en la información que nos provee cuando se gráfica una curva s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$. Como se muestra en la figura XVIII, las SNe la tienen una tendencia casi lineal cuando se ubican sus puntos en la gráfica s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$ para un valor de s_{BV} en el rango de 0.65 a 1.10. Por lo tanto, podemos categorizar a las SNe la como una SN la típica basándonos en su posición dentro de esta gráfica.

13). Diagrama Color-Color

Este diagrama muestra un gráfico que presenta, en la ordenada y la abscisa, colores que consisten en diferencias entre las magnitudes medidas en dos filtros diferentes y en general adyacentes (por ejemplo, $U-B$ frente a $B-V$, $B-V$ frente a $V-R$, etc.). Teniendo en cuenta que la elección de colores se obtiene buscando la mejor diferenciación del tipo de SN, además de la dependencia obvia del sistema de filtro utilizado.

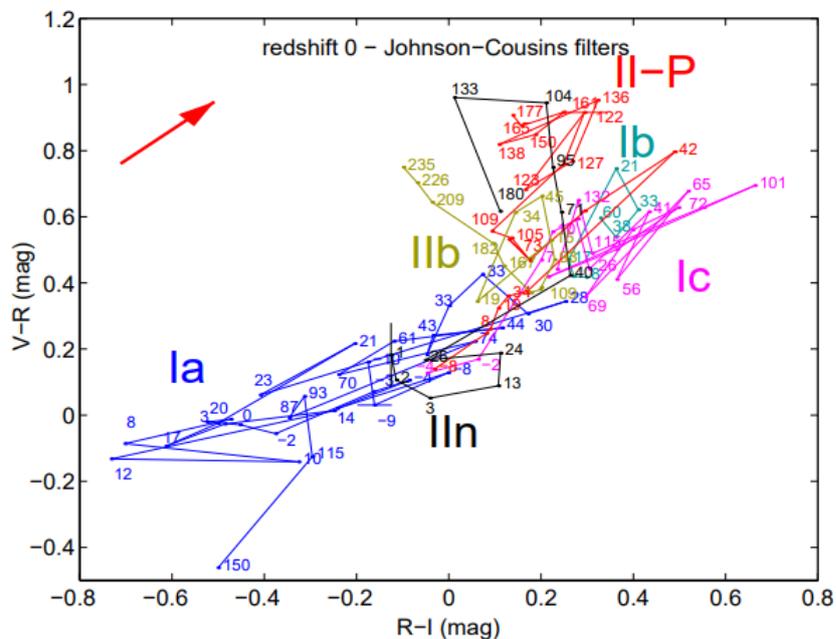


Figura XIX: Diagrama color-color para SNe tipo Ia (curva azul), tipo Ib (curva celeste), tipo Ic (curva morada), tipo IIb (curva mostaza), tipo IIc (curva negra) y tipo II-p (curva roja) con $redshift = 0$ [40].

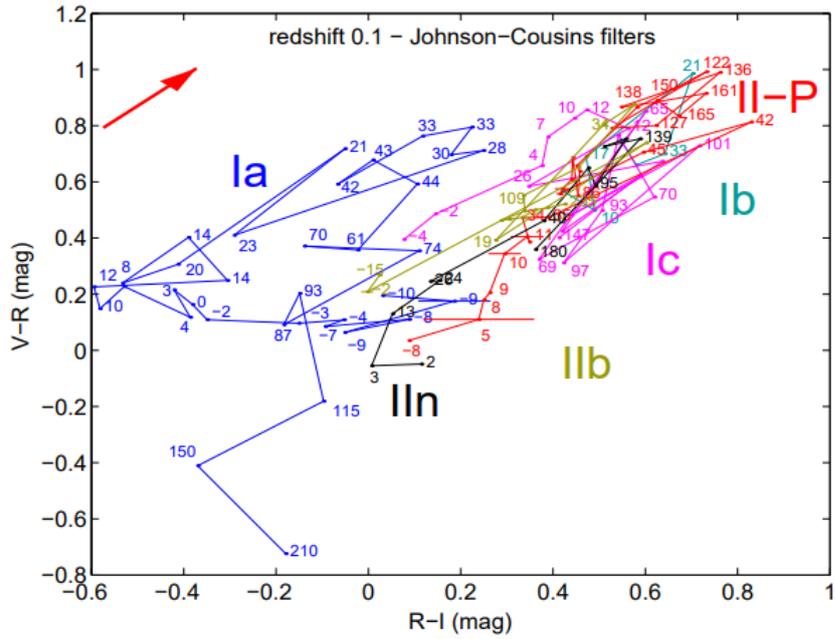


Figura XX: Diagrama color-color para SNe tipo Ia (curva azul), tipo Ib (curva celeste), tipo Ic (curva morada), tipo IIb (curva mostaza), tipo IIln (curva negra) y tipo II-p (curva roja) con $redshift = 0.1$ [40].

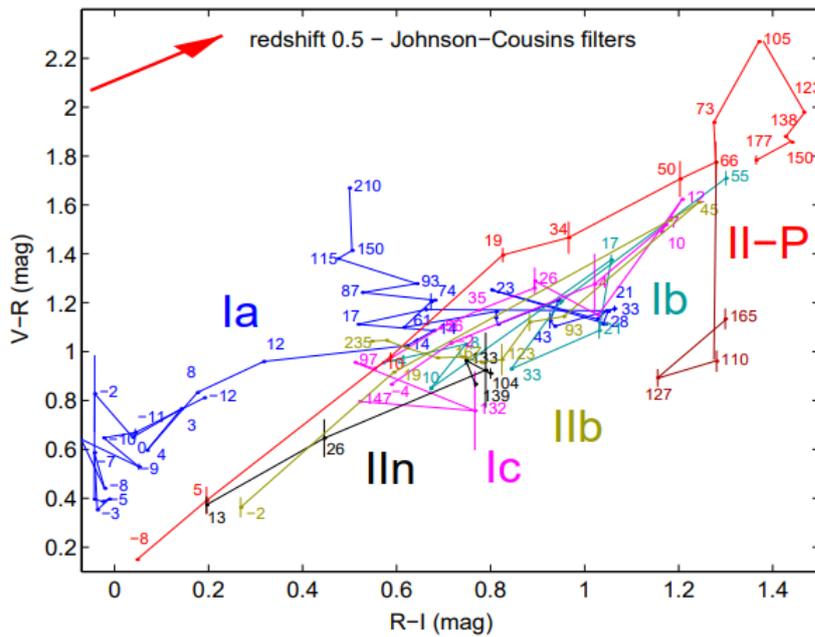


Figura XXI: Diagrama color-color para SNe tipo Ia (curva azul), tipo Ib (curva celeste), tipo Ic (curva morada), tipo IIb (curva mostaza), tipo IIln (curva negra) y tipo II-p (curva roja) con $redshift = 0.5$ [40].

Como la mayoría de estos eventos, la pendiente del continuo de las SNe en el inicio es muy azul y se vuelve más roja a medida que la SN envejece. Este proceso es dominante durante las primeras semanas de evolución de las SNe, pero luego es contrarrestado por la aparición de fuertes y anchas líneas de emisión en la parte azul del espectro. Este resultado concuerda perfectamente hasta alrededor de 70 días después del brillo máximo, donde aparece una bifurcación en nuestra ruta de color calculada [40]. Cabe resaltar que el diagrama de las figuras XIX-XXI varía a medida aumentamos el valor del *redshift*. Por lo que si bien se puede conocer la edad de la SN (contada desde el pico de la explosión), el diagrama también nos permite saber la distancia a la que se encuentra la SN. Pues el *redshift* está estrictamente ligado a la distancia observada. De esta manera, al observar una SN en distintos filtros de luz, también podemos inferir la distancia a la que se encuentra usando la relación de Hubble.

B. Marco conceptual

1). Magnitud aparente

En astronomía se suele usar una escala logarítmica para especificar la densidad de flujo y la luminosidad de los objetos astronómicos. Este sistema se originó en base a las primeras observaciones que se realizaron a simple vista, que reproducían el patrón de registro logarítmico ocular. Aunque la mayoría de las observaciones ahora se realizan mediante instrumentos, este sistema todavía se utiliza [41]. Como ya mencionamos con anterioridad la principal cantidad física que estudiamos de los objetos astronómicos es la densidad de brillo por unidad de área (Flujo, F), recibida en la Tierra, esta cantidad se puede expresar en términos de la magnitud aparente, m , definida como muestra la ec. 6.

$$m = -2,5 \times \log\left(\frac{F}{F_0}\right) \quad (6)$$

De la ecuación 6 se puede observar que la cantidad m no tiene unidades, donde F_0 es una densidad de flujo de una estrella de referencia. Además, para dos estrellas con densidades de flujo F_1 y F_2 , la diferencia de magnitud aparente está dada por la ecuación 7.

$$m_1 - m_2 = -2,5 \times \log\left(\frac{F_1}{F_2}\right) \quad (7)$$

De esta ecuación podemos establecer que la estrella con magnitud mayor parece menos brillante. Si $m_1 - m_2 = 5$, entonces $F_2 = 100F_1$ lo que significa que el flujo de la segunda estrella es 100 veces mayor al flujo de la primera estrella. El sistema de magnitud está diseñado para especificar el flujo de un objeto con respecto al flujo de alguna fuente estándar utilizada como referencia. Esto es conveniente porque la medición del flujo relativo es a menudo mucho más fácil y confiable en comparación con el flujo absoluto. Muchos errores instrumentales, así como distorsiones debidas a la atmósfera, se cancelan al medir la relación de dos flujos [41].

2). Módulo de distancia (μ)

Una vez definido el concepto de magnitud aparente, y, establecido que una magnitud absoluta es una magnitud aparente medida a una distancia de 10 pc^{17} , se puede definir un nuevo concepto, el módulo de distancia. Este módulo se expresa como la diferencia entre las magnitudes anteriormente nombradas. Ya que estas magnitudes están relacionadas con el flujo de la fuente como se muestra en la ec. 6, existe una relación, entre el flujo (F) y la distancia de la fuente (d), de la forma $F = \alpha d^{-2}$, donde α es una constante [41].

Por lo tanto la ec. 7, para una diferencia entre magnitudes aparentes (m) y absolutas (M), se puede escribir como:

$$\mu = m - M = 5 \times \log\left(\frac{d}{10}\right) \quad (8)$$

¹⁷1 Parsec = 3.26 años luz

Cabe resaltar que en la ec. 8 no se toma en cuenta el efecto de la extinción estelar (A).

Para el caso donde este efecto no es despreciable, se puede reescribir la ec. 8 como:

$$m - M = 5 \times \log(d) - 5 + A \quad (9)$$

3). Catálogos Astronómicos

Debido a que en este documento se presenta el método de fotometría diferencial, es de vital importancia conocer qué objetos se encuentran dentro del mismo campo observado de nuestra SN. Pues, si bien las estrellas son las principales fuentes de luz, no son las únicas, y para realizar la fotometría diferencial es necesario usar estrellas de comparación sino el resultado no será consistente. Para evitar esto, se realiza un análisis minucioso del espacio en el que se encuentra nuestro objeto astronómico, y es en este momento donde los catálogos astronómicos cobran suma importancia. Pues en ellos encontramos toda la información necesaria de los cuerpos presentes en el campo estelar a analizar, como por ejemplo el tipo de objeto astronómico que es, los filtros en los que fueron observados, las magnitudes que posee para diferentes rangos espectrales, entre otros.

Entre las más reconocidas bases de datos y/o catálogos astronómicos se encuentran *SIMBAD*, *VizieR*, *UCAC 4*, *Áladin*. Aunque es verdad que estos datos son examinados meticulosamente debido a que la información que en ellos se encuentra es usado por astrónomos a lo largo del mundo, es recomendable no combinar los datos de las estrellas de diferentes catálogos, para efectos de calibración fotométrica.

4). Día Juliano

Es un recuento propuesto por J. J. Scaliger en 1582 y denominado fecha juliana (JD) de una observación o evento. El punto cero se estableció lo suficientemente lejos en el pasado como para que todos los eventos astronómicos registrados tengan un JD positivo. Scaliger

sugirió el uso de la fecha juliana 0 a la hora 12 UT del 1 de enero de 4713 a.C. porque varios calendarios estaban en fase ese día. El *JD* comienza al mediodía porque la mayoría de los observadores activos en el siglo XVI estaban en Europa y no se produciría ningún cambio de fecha durante las observaciones nocturnas para ellos [31].

5). **Día Juliano Heliocéntrico (*HJD*)**

La fecha juliana heliocéntrica o *heliocentric julian date en inglés (HFD)* da la fecha juliana corregida por las diferencias en la posición de la Tierra con respecto al Sol. Cuando se cronometran eventos que ocurren más allá del Sistema Solar, debido a la velocidad finita de la luz, el tiempo en que se observa el evento depende de la posición cambiante del observador en el Sistema Solar [31].

C. **Técnicas utilizadas**

1). **Fotometría**

Para obtener información de los eventos astronómicos, se usa como principal herramienta el flujo emitido (luz) por los objetos celestes con la finalidad de determinar su cantidad y su naturaleza temporal. Este proceso es denominado fotometría.

2). **Fotometría de apertura**

Dependiendo de qué tan aglomeradas estén las estrellas en nuestras imágenes se puede realizar la fotometría de dos diferentes maneras; para objetos puntuales aislados, se suele usar la fotometría de apertura; mientras que para regiones densas en estrellas se suele usar la función de dispersión puntual o *point-spread function (PSF)*. En esta oportunidad nos centraremos en presentar el primer método. La fotometría de apertura es una técnica simple, tanto computacional como conceptualmente, que consiste en recopilar y sumar el brillo obtenido por

los píxeles dentro de un área o apertura específica centrada en el objeto a estudiar, en este caso una estrella [42].

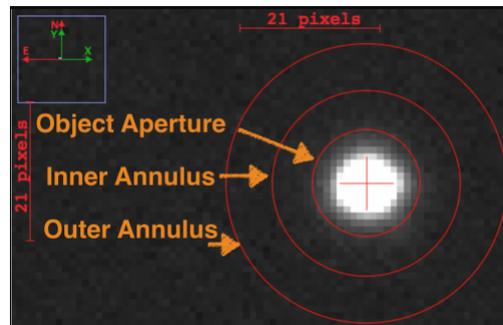


Figura XXII: Fotometría de apertura circular sobre una estrella usando tres aperturas [43].

Como se muestra en la figura XXII la apertura utilizada puede ser circular, cuadrada o cualquier forma donde se suele usar 2 o 3 aperturas concéntricas. Generalmente se suele usar una circunferencia pues tiende a obtener mejores resultados con menor error. Otro punto a resaltar es el radio que se toma para la apertura pues, si se toma un radio pequeño al evaluar una fuente muy luminosa se perderá gran parte de la información debido a la falta de píxeles a recopilar. Por otro lado, para un radio muy grande cuando la fuente tiene un brillo tenue, tendremos un mayor error debido a la gran cantidad de píxeles encerrados por la apertura. De esta manera, se trata de tomar un radio óptimo, cercano al valor del radio de la estrella, y donde las otras 2 aperturas se utilizan para calcular la magnitud del cielo. Para ello se toma un radio que sea múltiplo del *FWHM* (*Full Width Half Maximum*), que presenta una determinada distribución gausseana del brillo de una estrella. Esto facilita en gran medida la aproximación, de modo que para recuperar la *luz faltante*, se puede hacer uso del proceso de correcciones de apertura o curvas de crecimiento como detallan Howell (1989) y Stetson (1992), y de esa manera, es posible finalmente recopilar el 100% de la información de la estrella a estudiar.

3). Fotometría Diferencial

Además de su sencillez, es la técnica más precisa para medir variaciones de brillo. Esta técnica se usa ampliamente en estrellas variables, especialmente en variables de período corto y sistemas binarios eclipsantes.

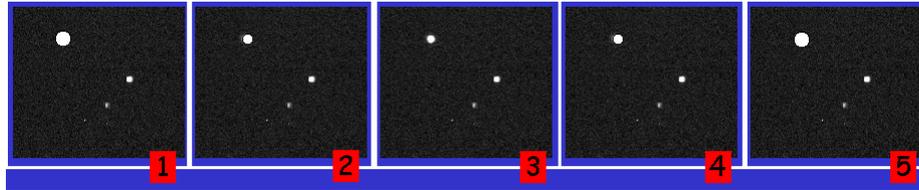


Figura XXIII: Fotometría diferencial sobre una estrella variable (esquina superior izquierda) usando tres estrellas de comparación (las tres estrellas inferiores) en cinco instantes de tiempo distintos [43].

Como se muestra en la figura XXIII, este método usa una segunda estrella de casi el mismo color y brillo que la estrella variable, de modo que se la utiliza como estrella de comparación. Esta estrella de referencia debe estar en el mismo campo de observación del detector junto a la estrella a analizar. Todos los cambios en la estrella variable se determinan como diferencias de magnitud entre ella y la estrella de comparación. Este tipo de fotometría puede ser extremadamente precisa (magnitud 0.005) y es muy recomendable donde las condiciones atmosféricas pueden ser bastante variables. Cualquier estrella que cumpla con los criterios puede ser una estrella de comparación. Sin embargo, es una buena idea elegir varias estrellas de comparación, como prueba de la no variabilidad de éstas [42]. Como ya se explicó las diferencias de magnitud entre la estrella variable y las de comparación en cada filtro se pueden calcular usando la ec. 6. Una ventaja de la fotometría diferencial es que en muchos proyectos no es necesario realizar ninguna calibración con el sistema fotométrico estándar. Pero para especificar las magnitudes o colores reales de la estrella variable se debe estandarizar las estrellas de comparación.

III. Desarrollo experimental y eventos de Supernovas analizados

A. Telescopio

El telescopio que fue utilizado para la obtención de las imágenes de las SNe, consta de 3 partes; el tubo óptico, la montura robótico y la cámara CCD [44] . Este sistema se puede observar en la figura XXIV.

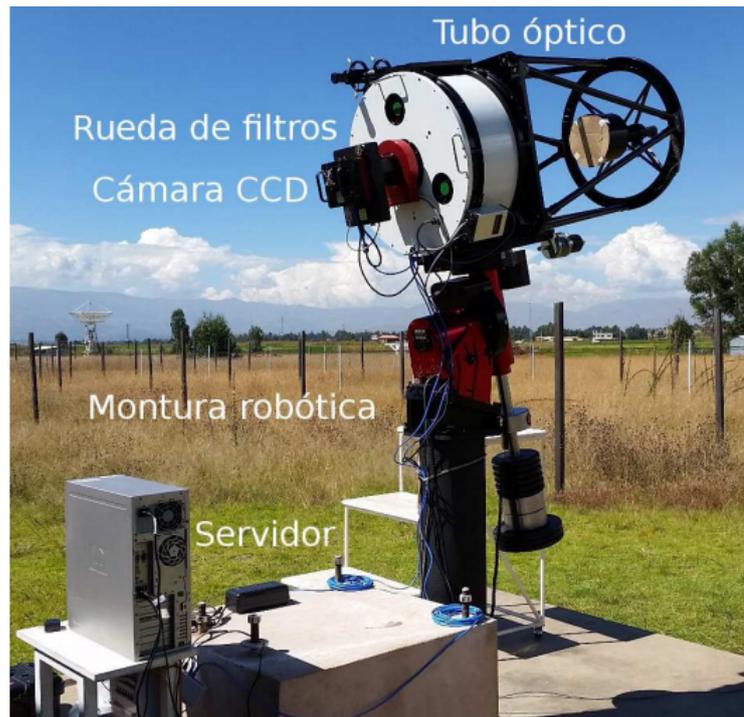


Figura XXIV: Equipamiento principal del OAUNI e instrumentos instalados en el Observatorio de Huancayo [44].

El tubo óptico tiene la función de eliminar la coma y producir un amplio campo de visión. El tubo es del tipo Cassegrain con diseño Ritchey-Chrétien y un espejo primario es de 0.51 m de diámetro. Además, el sistema está libre de aberraciones esféricas y, como sistema reflector, la aberración cromática es nula. La relación focal $f / 8.2$ del sistema.

La montura robótica es de alta precisión que se controla mediante el software *The Sky Pro*, con un precisión al apuntar menor a $30''$. Tiene una capacidad de carga útil de 109 kg, suficiente para soportar el tubo óptico y los instrumentos adicionales (cámaras y filtros).

La cámara CCD¹⁸ encargada de recopilar digitalmente las imágenes astronómicas consta de un chip con un tamaño de *pixel* de 9 μm y un área total de 3072 x 2048 *pixeles*². Presenta una ganancia de 1.5 e-/ADU y un ruido instrumental de 11 e- rms. Además, su gran tamaño junto con la relación focal del tubo óptico permiten tener un amplio campo de visión de $\sim 23' \times 15'$ con una escala de placa de 0.45 $''/\text{pixel}$. Esta cámara también acepta un rueda de filtros del tipo SBIG FW8G STXL, la cual contiene 8 tipos de filtros distintos.

B. Base de datos

La base de datos a utilizar contiene información fotométrica de cientos de miles de estrellas en los filtros astronómicos *V*, *R* e *I* utilizados, siendo filtros pertenecientes al sistema Johnson-Cousins. Los datos fueron analizados usando el visualizador de imágenes *ds9* en conjunto con el catálogo *UCAC4* [45]. Este último usa registros internacionales de estrellas observadas en todo el firmamento con errores menores a 0.1 mag, de esta manera permitiéndonos determinar las estrellas óptimas para nuestro procedimiento. Con el objetivo de mostrar la calidad de nuestros resultados, también se usó las magnitudes obtenidas de trabajos previos recolectados del telescopio *GAIA* y del grupo *ASAS-SN* para las SNe analizadas, entre otros.

C. Estructura metodológica

Antes de obtener las magnitudes de las SNe es necesario obtener las siguientes imágenes para el procedimiento de reducción:

- Imagen cruda. Es la imagen del objeto celeste de interés tal como fue obtenida en el observatorio.
- *Darks*. Imagen tomada con el obturador cerrado, con el mismo filtro y el mismo tiempo de exposición empleados en la toma de la imagen cruda.

¹⁸Dispositivos que si bien cumplen una función similar a las cámaras digitales, se apoyan en dispositivos de carga acoplada. Estos dispositivos, llamados también CCD por sus siglas en inglés (*charge-couple device*), constan de millones de diodos fotosensibles (*pixeles*) que se encargan de transformar la luz que reciben en señales eléctricas.

- Filtros de luz. Debido a que no todas las fuentes luminosas que se observan emiten la misma cantidad de brillo en la misma frecuencia, se suele usar filtros especiales de color. De esta manera se logra captar la mayor cantidad de flujo luminoso proveniente de nuestra fuente.
- *Darks* de los filtros. Imagen tomada con el obturador de la cámara CCD cerrada con el mismo filtro y el mismo tiempo de exposición empleados en la toma de filtros de luz.

En la figura XXV se presenta la estructura general de la metodología diseñada para el proceso de reducción de datos y la obtención de las magnitudes. Primero, a partir de las imágenes *darks*, se obtiene una imagen *dark* maestra y se les resta a las imágenes obtenidas con filtros, tanto de ciencia como *flat fields* (filtros). De esta manera se obtuvieron imágenes de *flat field* sin el *dark* de la cámara CCD y se promediaron las imágenes de los *flat field* que fueron usados, obteniendo una sola imagen llamada *flat field* maestro por cada filtro usado. Luego, usando los *flat field* maestros en cada filtro, se procedió a normalizarlos para luego dividirlos a las imágenes de ciencia, de modo a eliminar la sensibilidad diferencial del detector usado. También se hicieron correcciones por *overscan* y masa de aire.

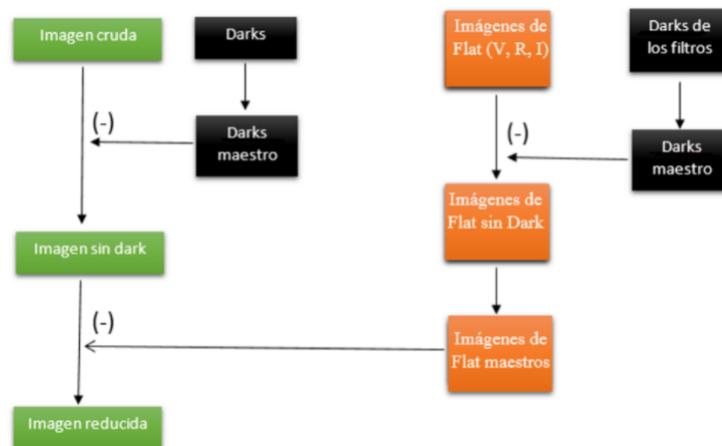


Figura XXV: Diagrama de flujo para esquematizar la metodología de la reducción de imágenes.

Asimismo, se realizó un control de calidad para saber cuáles imágenes son óptimas para la lectura de datos y posteriormente se combinaron en una imagen promedio, para cada filtro de

luz en las que fueron tomadas las imágenes. Finalmente se procede a seleccionar las estrellas del campo que se usarán como referencia obteniendo sus magnitudes instrumentales a partir de las propias imágenes, así como de los catálogos, con ayuda del programa *IRAF* y utilizando diferentes radios de apertura. De estos valores se determinan las constantes de transformación que se usaron para transformar el valor de la magnitud instrumental de la SN en una magnitud de catálogo.

D. Selección de estrellas de comparación

Debido al alto número de estrellas que se encuentran presentes en nuestras imágenes, está claro que debe existir una regla de como escoger las estrellas con las que se va a trabajar. Esta regla consiste en seleccionar las estrellas del campo basándonos en su brillo y sus colores $V-R$ y $R-I$.

Esto es así debido a que, cuando usamos estrellas con brillo similar al brillo de la SN se obtienen lecturas con menor error. Así mismo mantener una baja dispersión de los colores de las estrellas de comparación permite una mejor calibración de nuestros valores instrumentales de las SNe.

E. Entorno computacional

La implementación de la metodología presentada en este trabajo fue desarrollada en *IRAF* 2.16.1 [46] y utiliza los siguientes paquetes:

- Noao: paquete de computación científica que incluye herramientas útiles para la reducción de imágenes.
- Stsdas: conjunto de herramientas gráficas especializada en visualización 2D.
- Ctio: librería que agrupa distintas herramientas estadísticas.

IV. Análisis y discusión de resultados

A. AT 2015dd

1). Observaciones desde el OAUNI

En este caso, el OAUNI registró el brillo de la SN AT 2015dd (figura XXVI) durante un total de 48 minutos de observación (un total de 90 imágenes de ciencia) luego de la campaña del 10 de Enero del 2016 UT (tabla I) en las que se usaron los tres filtros (*V*, *R* e *I*). Para poder trabajar con estas imágenes, en primer lugar se realizó el proceso reducción de imágenes descrito en el capítulo 3 y luego se procedió a realizar el control de calidad. Este control consistió en una rutina de análisis de curvas de luz semi-automática llamada *lcurve* desarrollada en el Grupo de Investigación en Astronomía y Astrofísica (GIAA) de la Universidad Nacional de Ingeniería.

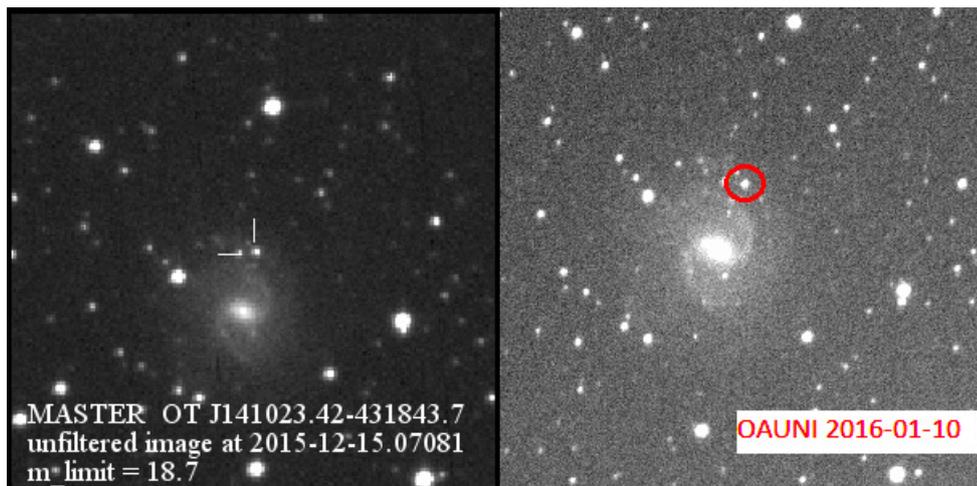


Figura XXVI: Imagen del descubrimiento de la SN AT 2015dd el día 15 Diciembre del 2015 por el sistema *MASTER-SSAO* (izquierda, [1]) junto a una imagen obtenida desde el OAUNI el día 10 Enero del 2016 UT (derecha).

En la tabla I se muestran los datos de las imágenes tomadas para el día 10 de Enero, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros del día 11 del mismo mes. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado para la obtención de cada imagen.

Tabla I

Registro de observación de la SN AT 2015dd

Día	10/01/2016
Imágenes (<i>I</i>)	30(20s)
Imágenes (<i>R</i>)	30(20s)
Imágenes (<i>V</i>)	30(20s)
<i>Darks</i>	20(20s)
Día	11/01/2016
<i>Flat field</i> (<i>V</i>)	25(4s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	25(3s)
<i>Flat field</i> (<i>I</i>)	25(3s)
<i>Darks'</i> (<i>V</i>)	25(4s)
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	25(3s)
<i>Darks'</i> (<i>I</i>)	25(3s)

Un ejemplo de la calidad de las imágenes trabajadas se puede apreciar en los subgráficos de la figura XXVII que corresponde a una noche de observación. En el subgráfico superior se compara la consistencia de las magnitudes instrumentales que presentan 3 estrellas cualesquiera en cada una de las imágenes.

Por otro lado, en el subgráfico inferior se calcula la diferencia de estas magnitudes con el objetivo de analizar la homogeneidad de la variabilidad de las magnitudes de las estrellas seleccionadas. Esto se realizó para evaluar la calidad de la reducción, mostrando que efectivamente la reducción de imágenes fue óptima y que la calidad de las imágenes fue muy buena para los filtros *V*, *R* e *I*. Debido a esto se pudo encontrar valores promedio para las desviaciones en el rango de 0.011, 0.010 y 0.008 mag para cada noche en los filtros *V*, *R* e *I*, respectivamente. Los valores anteriores indican que se pudo lograr una gran estabilidad en las medidas realizadas.

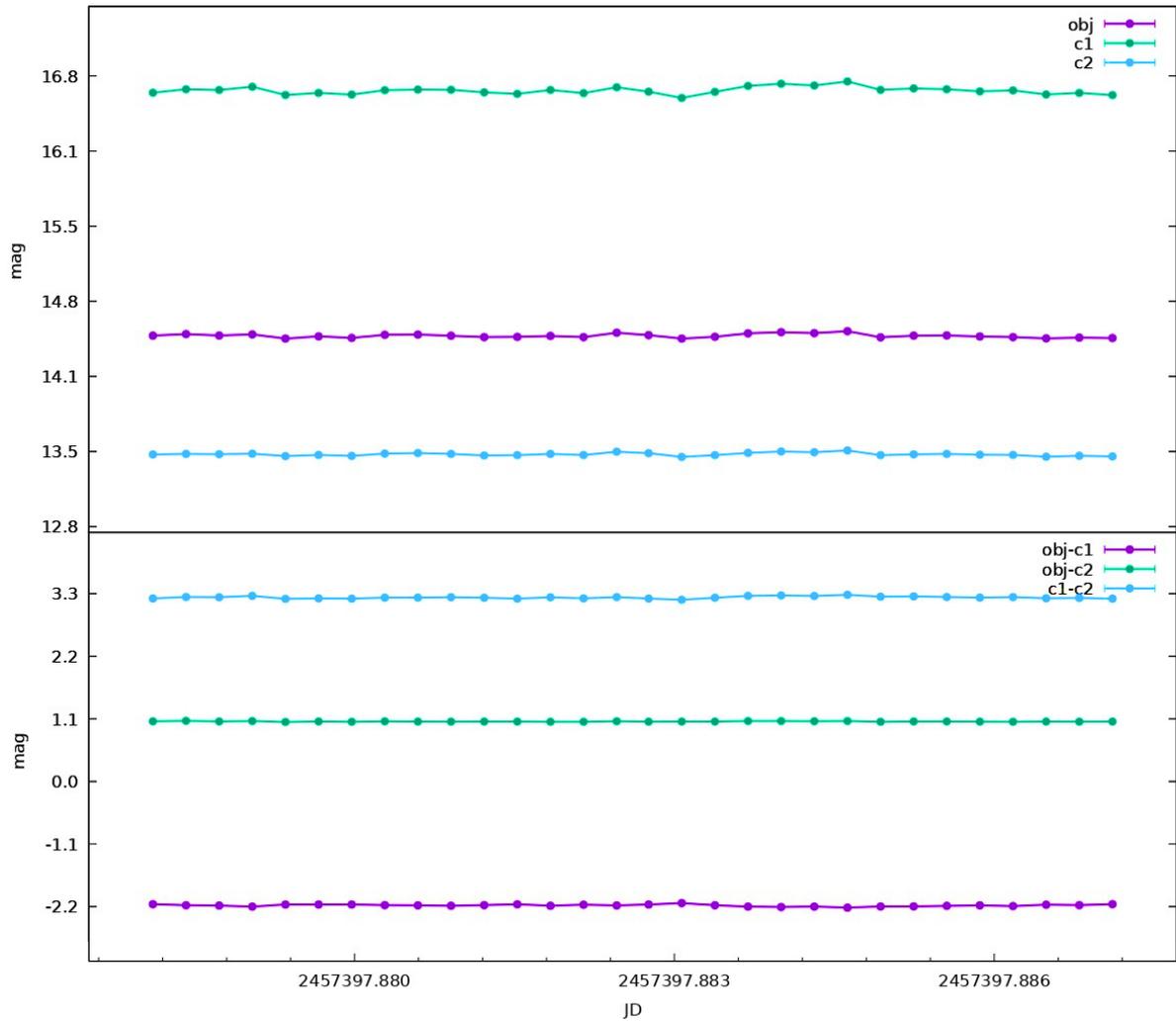


Figura XXVII: Control de calidad para los datos de la SN AT 2015dd obtenidas en el OAUNI para el filtro V del día 10 de Enero UT.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN AT 2015dd, se identificó cinco estrellas de campo comunes a nuestras imágenes y al catálogo astronómico UCAC4 que fueron usadas como estrellas de comparación. Usando este criterio, se seleccionaron las estrellas que aparecen encerrados en un círculo amarillo en la figura XXVIII y listados en la tabla II. Además se señala mediante una flecha negra la posición de la SN 2015dd en este campo estelar.



Figura XXVIII: Campo estelar que rodea a la SN AT 2015dd, donde se muestran las estrellas de comparación del catálogo astronómico UCAC4 [45] listadas en la tabla II.

Tabla II

Estrellas de comparación de la SN AT 2015dd			
Objeto	$V_{catálogo}$	$R_{catálogo}$	$I_{catálogo}$
UCAC4 235-072564	10.607	10.968	11.356
UCAC4 235-072546	12.108	12.394	12.711
UCAC4 234-070894	9.879	9.879	9.800
UCAC4 234-070931	9.965	10.353	10.706
UCAC4 234-070956	12.292	12.591	12.923

Usando las magnitudes aparentes (en los filtros V , R e I) de la tabla II se determinó el valor corregido del brillo de la SN por el método de un único punto cero (m_1).

$$V = v_0 + v \quad (10)$$

$$R = r_0 + r \quad (11)$$

$$I = i_0 + i \quad (12)$$

Como se muestra en las ec. 10, 11 y 12, esta corrección consiste en obtener un único punto cero a partir de las estrellas de comparación. Este valor representa la transformación de las magnitudes instrumentales a las magnitudes calibradas establecidas en el catálogo *UCAC4*. Este método es útil cuando solo se dispone de mediciones en un filtro y se aplicó en todos los objetos de nuestra muestra. En este documento se representa cada punto cero mediante las constantes v_0 , r_0 o i_0 dependiendo de la banda en la que se encuentra la magnitud a calibrar. Asimismo, como las constantes se obtienen de las estrellas de comparación, la precisión de este método depende únicamente de las estrellas listadas en la tabla II. Habiendo dicho esto, el valor del punto cero y el valor corregido que se encontraron en los tres filtros para esta SN se muestran en las tablas III y IV.

Tabla III

Coeficientes del método de calibración m_1
de la SN AT 2015dd

Día	10/01/2016
v_0	-1.126 ± 0.208
r_0	-0.171 ± 0.043
i_0	-0.853 ± 0.167

Tabla IV

Magnitudes calibradas por el método m_1
de la SN AT 2015dd

Día	10/01/2016
V_{m_1}	16.470 ± 0.060
R_{m_1}	15.992 ± 0.033
I_{m_1}	15.565 ± 0.037

Por otro lado, como esta SN ha sido observada usando tres filtros distintos para un mismo día se puede usar otro método de calibración. El segundo método (m_2) utiliza las ecuaciones de transformación que incluyen los puntos cero (v_0 , r_0 e i_0), la dependencia lineal (v_1 , r_1 e i_1) y los coeficientes (v_2 , r_2 e i_2) para los términos de color ($v-r$ o $v-i$) de los objetos considerados. Este método de calibración es más robusto pero es necesaria la fotometría multicolor para su aplicabilidad [47]. Esto permite calibrar nuestras magnitudes instrumentales con mayor precisión, pero supone un menor número de estrellas de comparación que se pueden escoger. Esto se debe a que una significativa variabilidad del color que pueden presentar nuestras estrellas significaría una mayor incertidumbre en las magnitudes calibradas de nuestra SN.

Debido a la anterior consideración, las ecuaciones del segundo método pasan a tener la siguiente forma :

$$V = v_0 + v_1 \times v + v_2 \times (v - r) \quad (13)$$

$$R = r_0 + r_1 \times r + r_2 \times (v - r) \quad (14)$$

$$I = i_0 + i_1 \times i + i_2 \times (v - i) \quad (15)$$

donde $r_{1,2,3}$, $v_{1,2,3}$ e $i_{1,2,3}$ son constantes. En la tabla V se muestran los valores de las constantes de estas ecuaciones cuando se usaron las mismas estrellas de comparación del primer método (tabla II).

Tabla V

Coeficientes del método de calibración m_2
de la SN AT 2015dd

Constantes	10/01/2016)
v_0	0.627 ± 0.018
v_1	0.902 ± 0.254
v_2	-0.072 ± 0.020
r_0	0.672 ± 0.012
r_1	0.925 ± 0.898
r_2	0.013 ± 0.013
i_0	-0.688 ± 0.011
i_1	0.912 ± 0.118
i_2	0.095 ± 0.012

Usando los datos de la tabla V junto a las ecuaciones 13, 14 y 15 se obtuvieron las magnitudes aparentes calibradas por el método m_2 para la SN AT 2015dd, como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI

Magnitudes calibradas por el método m_2 de la SN AT 2015dd			
Día	V_{m_2}	R_{m_2}	I_{m_2}
10/01/2016	16.797 ± 0.060	15.933 ± 0.033	15.681 ± 0.037

Al tener las magnitudes calibradas por los dos métodos en las tablas IV y VI se puede observar las diferencias que los valores resultantes presentan. Mientras que la mayor diferencia aparece en las magnitudes calibradas en el filtro V (0.327 mag), la menor diferencia la tenemos en el filtro R (0.059 mag).

Tabla VII

Valores de los colores $V-R$ y $R-I$ por el método de calibración m_2
de la SN AT 2015dd

Día	$V_{m_2} - R_{m_2}$	$R_{m_2} - I_{m_2}$
10/01/2016	0.864 ± 0.047	0.252 ± 0.035

Finalmente, usando los valores de las magnitudes aparentes calibradas de la tabla VI de la SN AT 2015dd se pudo determinar los colores $V-R$ y $R-I$. Estos valores se presentan en la tabla VII.

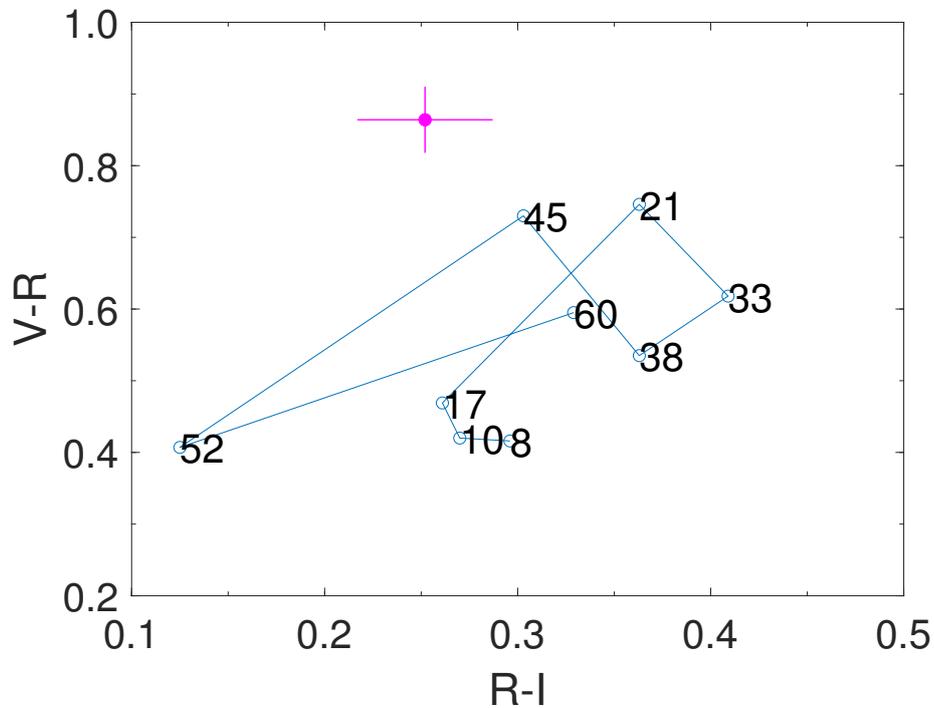


Figura XXIX: Diagrama $V-R$ vs. $R-I$ para una SN de Tipo Ib con $z = 0$ (línea azul, adaptado de [40]), junto con los colores de OAUNI para la SN AT 2015dd utilizando la calibración m_2 (punto magenta). Los números indican días después del máximo de brillo.

Los diagramas de diagnóstico color-color son útiles para verificar la edad de un determinada SN después de su máximo de brillo [40]. Considerando que la SN AT 2015dd fue clasificado como SN Tipo Ib y el *redshift* de la galaxia hospedera ($z = 0.005921$) es cercano a cero la figura XXIX muestra el comportamiento temporal de un SN Tipo Ib bien estudiado en diferentes etapas de su vida para $z = 0$. Calculamos los colores $V-R$ y $R-I$ para AT 2015dd usando la calibración m_2 (tabla VI) y los valores $V_{m_2} - R_{m_2} = 0.864 \pm 0.047$ y $R_{m_2} - I_{m_2} = 0.252 \pm 0.035$ también se muestran en la figura XXIX. La ubicación de AT 2015dd en el diagrama no es suficiente para confirmar directamente la edad del SN, pero sugiere un tiempo de 20 a 45 días después del máximo de brillo. Sin embargo, considerando el día de la explosión el 8 de diciembre de 2015 [2], nuestras observaciones son aproximadamente ~ 32 días después del

máximo.

B. 2016cvk

1). Observaciones desde el OAUNI

En este caso, el OAUNI obtuvo un total de 270 imágenes de ciencia para la SN 2016cvk luego de realizar observaciones el 5 de Setiembre del 2016 UT (tabla VIII). Cabe notar que para este día se realizaron dos secuencias de observaciones en las que se usaron los tres filtros (V , R e I). Con todo, se pudo trabajar con datos equivalentes a 2 horas y 7 minutos de observación para esta SN.

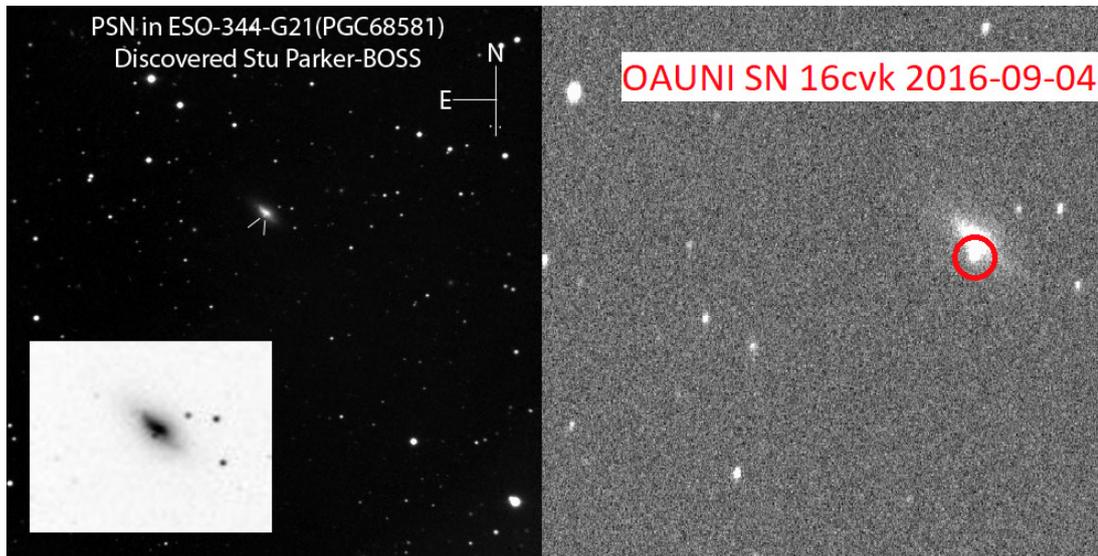


Figura XXX: Imagen del descubrimiento de la SN 2016cvk el día 12 Junio del 2016 por S. Parker (izquierda, [5]) junto a una imagen obtenida desde el OAUNI el día 5 Setiembre del 2016 UT (derecha).

En la tabla VIII se muestra el registro de las imágenes tomadas para el día 05 de Setiembre (secuencia 1 y 2), donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros del día 05 de Agosto. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado para la obtención de cada imagen.

Tabla VIII

Registro de observación de la SN 2016cvk		
Día	05/09/2016 (sec. 1)	05/09/2016 (sec. 2)
Imágenes (<i>I</i>)	45(20s)	45(20s)
Imágenes (<i>R</i>)	45(20s)	45(20s)
Imágenes (<i>V</i>)	45(20s)	45(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	-
Día	05/08/2016 (sec. 1)	05/08/2016 (sec. 2)
<i>Flat field</i> (<i>V</i>)	30(12s)	-
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	30(14s)	-
<i>Flat field</i> (<i>I</i>)	30(14s)	-
<i>Darks'</i> (<i>V</i>)	30(12s)	-
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	30(14s)	-
<i>Darks'</i> (<i>I</i>)	30(14s)	-

De manera similar a la SN mostrada anteriormente se muestra un ejemplo del registro de la calidad de las imágenes y la consistencia de sus lecturas la figura XXXI. Para esta SN se obtuvo desviaciones promedio de la fotometría diferencial en el rango de 0.010 mag mostrando que la estabilidad de las medidas realizadas se mantuvo óptima como en el caso anterior.

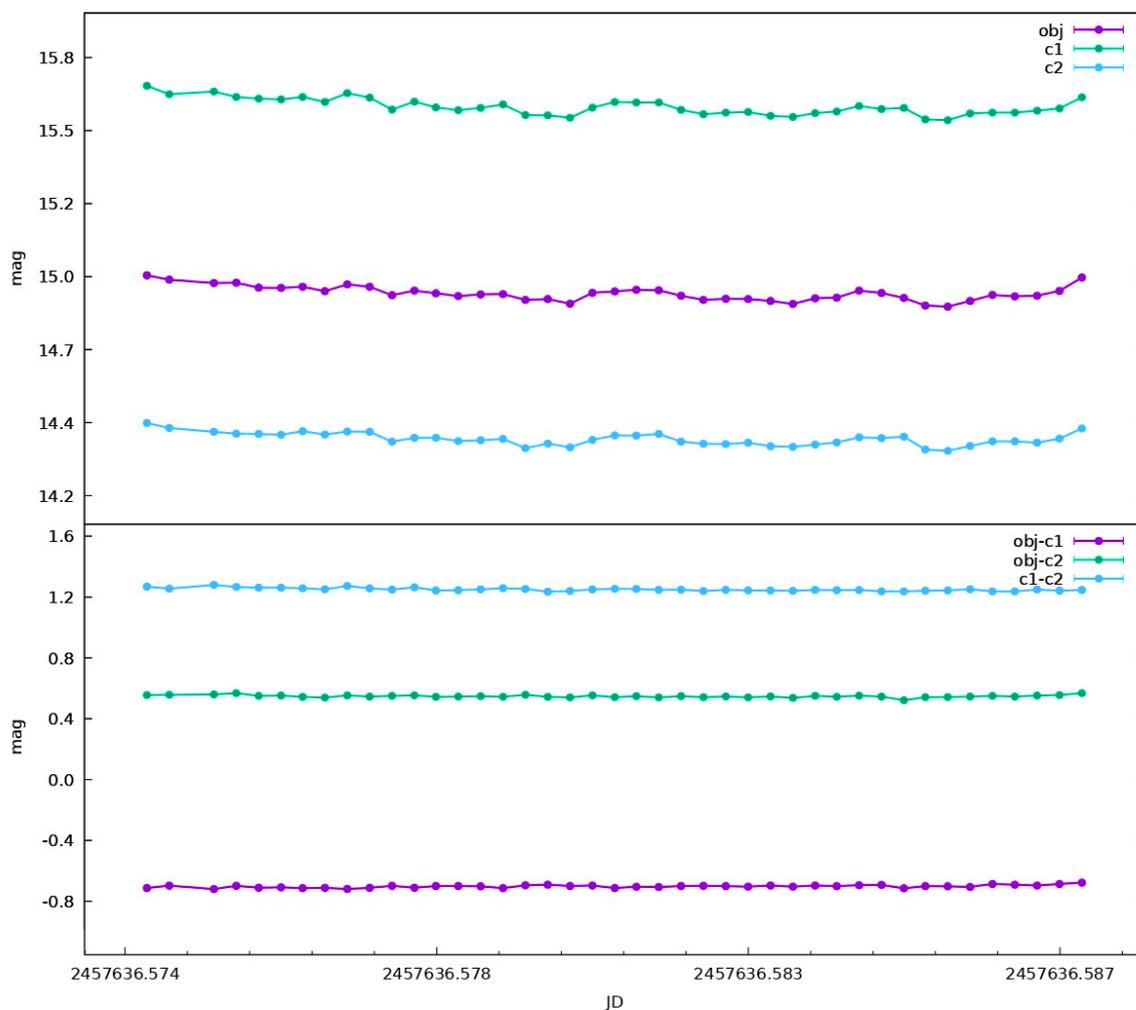


Figura XXXI: Control de calidad para los datos de la SN 2016cvk obtenida en el OAUNI para el filtro R para la primera secuencia del día 5 de Setiembre UT.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN 2016cvk, las ocho estrellas de campo comunes a nuestras imágenes y al catálogo fotométrico UCAC 4 se muestran encerrados en un círculo amarillo en la figura XXXII y listados en la tabla IX. Asimismo, mediante una flecha negra se indica la posición de la SN 2016cvk en la imagen.

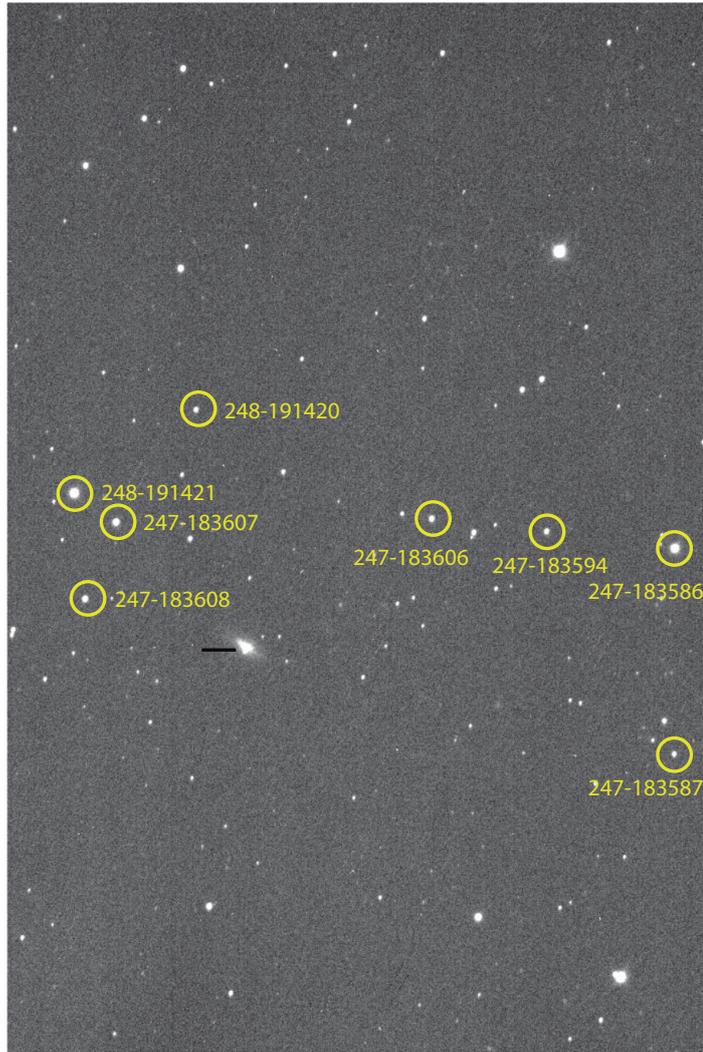


Figura XXXII: Campo estelar que rodea a la SN 2016cvk, donde se muestran las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla IX.

Tabla IX

Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN 2016cvk

Objeto	$V_{catálogo}$	$R_{catálogo}$	$I_{catálogo}$
UCAC4 247-183586	12.291	12.176	12.060
UCAC4 247-183587	15.491	15.333	15.205
UCAC4 247-183594	14.920	14.771	14.651
UCAC4 247-183606	14.646	14.477	14.352
UCAC4 247-183607	13.416	13.317	13.222
UCAC4 247-183608	14.249	14.099	13.966
UCAC4 248-191420	12.131	11.962	11.834
UCAC4 248-191421	15.182	15.036	14.954

A continuación en la tabla X se muestran las constantes que se obtuvieron tras usar el método de calibración m_1 de manera análoga al caso de la SN AT 2015dd. Así como los valores calibrados que resultaron de usar estas constantes (tabla XI).

Tabla X

Coeficientes del método de calibración m_1 de la SN 2016cvk

Día	05/09/2016 (sec. 1)	05/09/2016 (sec. 2)
v_0	-1.513 ± 0.109	-1.288 ± 0.083
r_0	-0.535 ± 0.080	-0.838 ± 0.072
i_0	-2.098 ± 0.075	-1.936 ± 0.081

Tabla XI

Magnitudes calibradas por el método de calibración m_1 de la SN 2016cvk

Día	05/09/2016 (sec. 1)	05/09/2016 (sec. 2)	05/09/2016 (prom)
V_{m_1}	15.024 ± 0.075	15.026 ± 0.083	15.025 ± 0.079
R_{m_1}	15.279 ± 0.080	15.088 ± 0.072	15.183 ± 0.076
I_{m_1}	15.251 ± 0.076	15.242 ± 0.082	15.246 ± 0.079

Por otro lado, como la SN ha sido observada en tres filtros distintos en un mismo día se puede usar el método de calibración que incluye la dependencia del color de los objetos considerados (método de calibración m_2).

Tabla XII

Coeficientes del método de calibración m_2 de la sec. 1 de la SN 2016cvk

Constantes	05/09/2016 (sec. 1)
v_0	0.887 ± 0.129
v_1	0.869 ± 0.006
v_2	-0.382 ± 0.180
r_0	1.021 ± 0.123
r_1	0.870 ± 0.006
r_2	0.161 ± 0.168
i_0	0.231 ± 0.136
i_1	0.859 ± 0.007
i_2	0.269 ± 0.188

Tabla XIII

Coeficientes del método de calibración m_2 de la sec. 2 de la SN 2016cvk

Constantes	05/09/2016 (sec. 2)
v_0	1.114 ± 0.064
v_1	0.854 ± 0.005
v_2	-0.271 ± 0.159
r_0	1.171 ± 0.062
r_1	0.863 ± 0.005
r_2	0.018 ± 0.148
i_0	0.553 ± 0.121
i_1	0.847 ± 0.006
i_2	0.237 ± 0.152

Para ello se usaron las ecuaciones 13, 14 y 15. Los valores de las constantes de estas ecuaciones se muestran en las tablas XII y XIII.

Tabla XIV

Magnitudes calibradas por el método m_2 de la SN 2016cvk

Día	V_{m_2}	R_{m_2}	I_{m_2}
05/09/2016 (sec. 1)	14.976 ± 0.057	14.902 ± 0.055	14.912 ± 0.070
05/09/2016 (sec. 2)	14.938 ± 0.047	14.921 ± 0.046	14.906 ± 0.060
05/09/2016 (prom.)	14.957 ± 0.052	14.911 ± 0.050	14.909 ± 0.065

Usando los datos de la tablas XII y XIII junto a las ecuaciones 13 y 14 se obtuvieron las magnitudes aparentes calibradas por el método m_2 para la SN estudiada, como se muestran en la tabla XIV. En esta tabla, se puede apreciar que los valores obtenidos de los tres filtros por ambos métodos resultan similares.

Tabla XV

Valores de los colores $V-R$ y $R-I$ de la SN 2016cvk

Día	$V_{m_2} - R_{m_2}$	$R_{m_2} - I_{m_2}$
05/09/2016 (sec. 1)	0.073 ± 0.005	-0.010 ± 0.007
05/09/2016 (sec. 2)	0.017 ± 0.005	0.015 ± 0.007
05/09/2016 (promedio)	0.045 ± 0.005	0.002 ± 0.007

Asimismo con los valores de las magnitudes aparentes de las dos secuencias de la SN 2016cvk se pudo determinar los colores $V_{m_2} - R_{m_2}$ y $R_{m_2} - I_{m_2}$ para ambas secuencias, así como un valor promedio de estos colores como se muestra en la tabla XV. Los valores tan pequeños de $V_{m_2} - R_{m_2}$ y $R_{m_2} - I_{m_2}$ son una consecuencia directa de los valores próximos de V_{m_2} , R_{m_2} e I_{m_2} mostrados en la tabla XIV. Por otro lado, a pesar de la similaridad de los valores de ambas secuencias, dichas en el párrafo anterior, los colores $V_{m_2} - R_{m_2}$ y $R_{m_2} - I_{m_2}$ presentan valores muy distintos en la tabla XV.

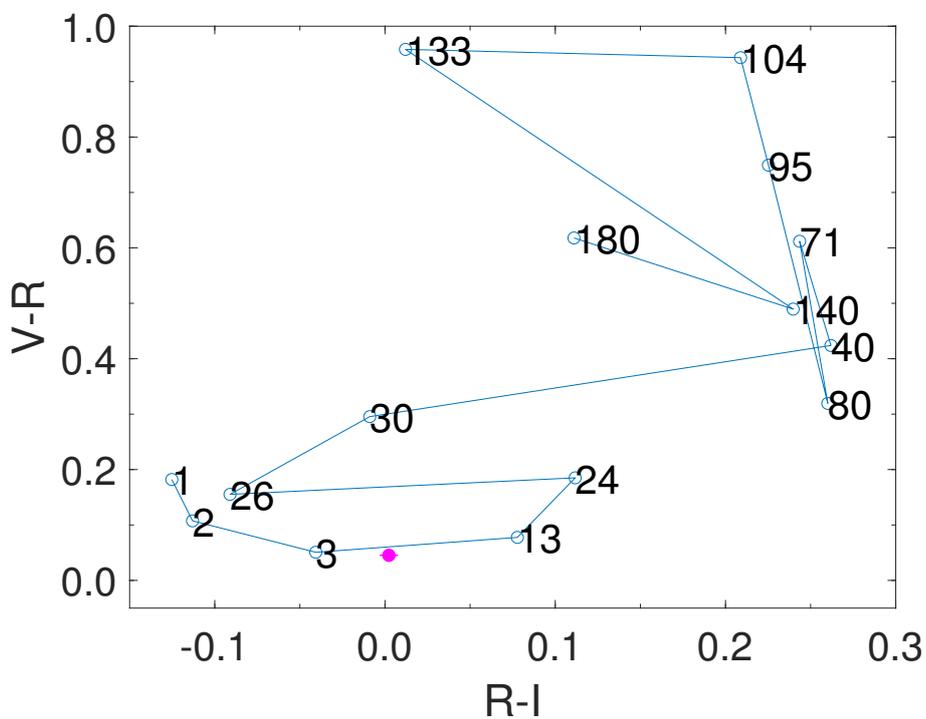


Figura XXXIII: Diagrama $V-R$ vs. $R-I$ para una SN de Tipo II con $z = 0$ (línea azul, adaptado de [40]), junto con los colores promedio de OAU NI para la SN 2016cvk utilizando la calibración m_2 (punto magenta). Los números indican días después del máximo de luz.

De la figura XXXIII y usando los valores promedios de los colores $V_{m_2} - R_{m_2}$ y $R_{m_2} - I_{m_2}$ se puede observar que la SN 2016cvk se encuentra muy próxima a la recta de los días 3 y 13, lo que nos podría indicar que esta SN se encontraba en sus primeros días de vida cuando fue observada por el OAU NI.

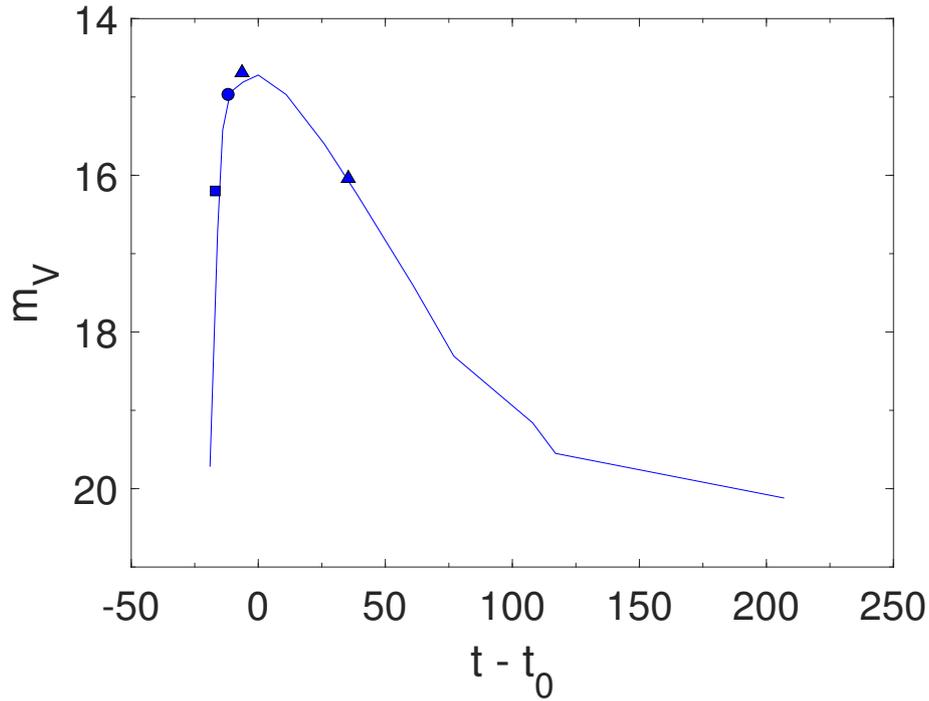


Figura XXXIV: Curva de luz de la SN 2016cvk en el filtro V . *Template* de la curva de luz para una supernova de Tipo II n con $z = 0$ (línea azul, adaptado de [49]), junto con datos de ASASSN (cuadrado azul, [7]), datos de Kato (triángulos azules, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-recent-sn/6612>) y datos m_2 promedio de OAUNI (puntos azules, tabla XIV). Offsets temporal $t_0 = 2457648.5$ JD.

Posteriormente, construimos la curva de luz en el filtro V para este SN usando un *template* [49], datos del grupo ASASSN, datos de Kato y datos m_2 del OAUNI (tabla XIV). Se graficó el *template* de Nugent [49] para verificar si el brillo de este SN se comporta de manera similar al brillo promedio de SNe tipo II n para diferentes fechas. Debido a que el *template* de Nugent se construyó estableciendo el pico de brillo en el filtro B de la coordenada temporal, necesitamos ajustar todos los datos al mismo sistema de referencia para compararlos. Primero, ajustamos los valores cercanos al pico del *template* a un polinomio como indica la ecuación 16.

$$m(t) = \sum_{i=0}^6 m_i \times (t - t_0)^i \quad (16)$$

En este polinomio, variamos m_0 y t_0 para determinar los valores que presentan el menor residuo cuando usamos datos de la SN cerca del pico. Antes de reemplazar estos datos, resta-

mos la contribución *redshift* (z) de la galaxia hospedera ($z = 0.010842$) del tiempo de los datos dividiéndolos por $(1+z)$. Así, después de reemplazar los datos de SN en la ecuación obtuvimos el vector final $(t_0; m_0)$ y el residuo calculado, lo que nos permite acomodar el template a los datos graficados. Como se desconoce la fecha exacta del máximo brillo, utilizamos la información sugerida por el diagrama de diagnóstico (figura XXXIII) para establecer el punto inicial de la iteración de t_0 . Como resultado obtuvimos el vector $(t_0 = 2457648.5 \text{ JD}; m_0 = 14.7197 \text{ mag})$. La figura XXXIV muestra el resultado final de la construcción de la curva de luz donde los datos siguen el camino del template. Los datos del OAUNI se establecen alrededor del día ~ -12 antes del pico, siendo que este resultado no es consistente con el diagrama de diagnóstico que establece este evento entre el día 3 y 10 después del pico.

C. AT 2016eqb

1). Observaciones desde el OAUNI

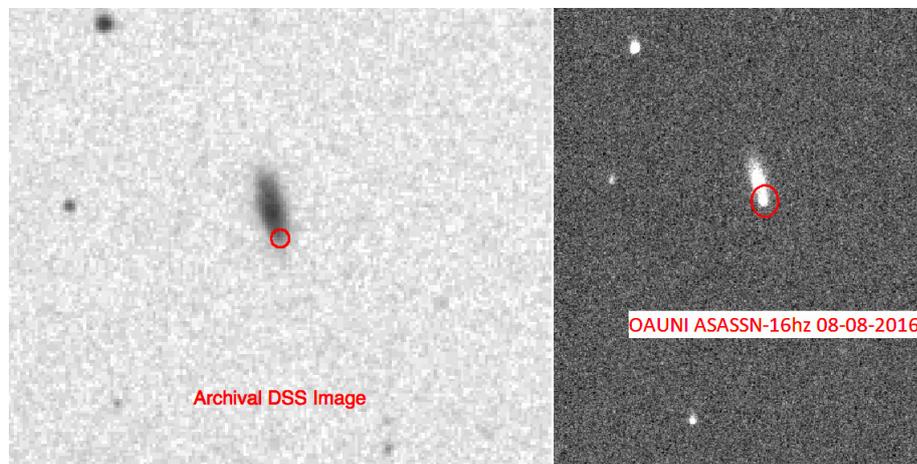


Figura XXXV: Imagen del descubrimiento de la SN AT 2016eqb por el grupo ASASSN el día 1 de agosto del 2016 [7] (izquierda) junto a la imagen obtenida desde el OAUNI el día 9 de Agosto del 2016 (derecha).

A partir del reporte del grupo ASAS-SN [7] el día 1 de agosto del 2016 acerca del descubrimiento de esta SN, el OAUNI realizó observaciones la noche del 9 de Agosto UT obteniendo imágenes del objeto celeste para los filtros V y R . Debido a estas observaciones, se obtuvo y se trabajó con un conjunto de 90 imágenes de ciencia (tabla XVI) para esta SN.

Esto representa un total de 28 minutos de observación, pues cada imagen tiene un tiempo de exposición de 20s.

Tabla XVI

Registro de observación de la SN AT 2016eqb	
Día	09/08/2016
Imágenes (<i>V</i>)	45(20s)
Imágenes (<i>R</i>)	45(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)
Día	05/08/2016
<i>Flat field</i> (<i>V</i>)	30(12s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	30(14s)
<i>Darks'</i> (<i>V</i>)	30(12s)
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	30(14s)

En la tabla XVI se muestran los datos de las imágenes tomadas para el día 9 de Agosto UT, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros del día 5 del mismo mes. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado para la obtención de cada imagen.

En la figura XXXVI se muestra que la reducción de imágenes fue óptima y que la calidad de las imágenes fue muy buena para el filtro *R*. Por otro lado, para el filtro *V* el resultado fue similar ya que se encontraron valores de desviaciones en el rango de 0.007 mag y 0.012 mag, respectivamente. Los valores anteriores indican que se pudo lograr una gran estabilidad en las medidas realizadas.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN AT 2016eqb, se identificó seis estrellas de campo comunes a nuestras imágenes y al catálogo fotométrico UCAC 4, que fueron usadas como estrellas de comparación. Usando estos datos, se seleccionaron las estrellas que aparecen encerrados en un círculo amarillo en la figura XXXVII y listados en la tabla XVII. Además

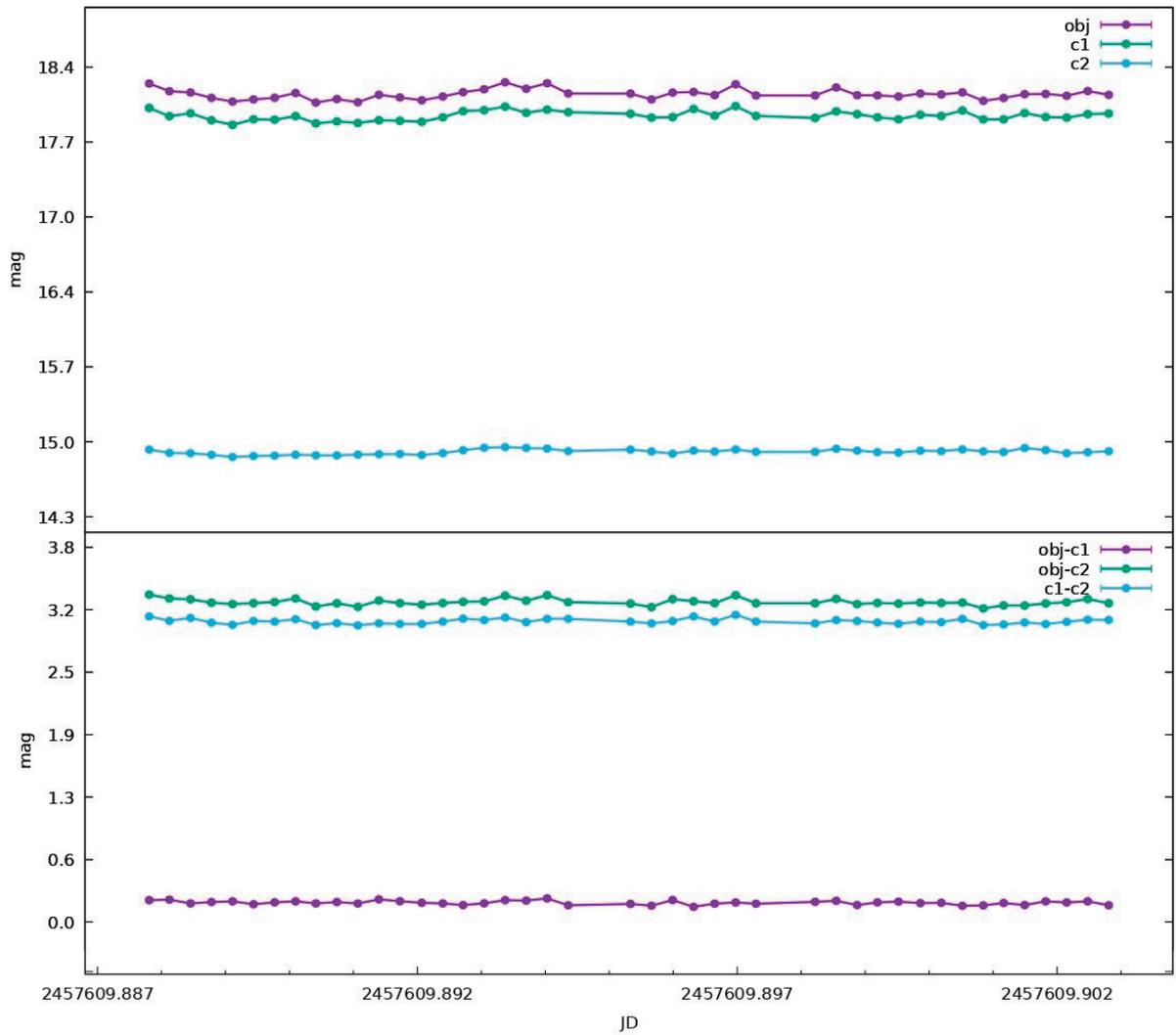


Figura XXXVI: Control de calidad para los datos de la SN AT 2016eqb obtenida en el OAUNI para el filtro R del día 9 de Agosto UT.

se señala mediante una flecha negra la posición de la SN 2016eqb en este campo estelar.

Tabla XVII

Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN AT 2016eqb

Objeto	$V_{catalogo}$	$R_{catalogo}$
UCAC4 444-131450	16.501	15.924
UCAC4 444-131442	15.745	15.506
UCAC4 445-136436	16.153	16.061
UCAC4 445-136441	16.506	16.386
UCAC4 445-136458	15.839	15.539
UCAC4 445-136465	16.083	15.858

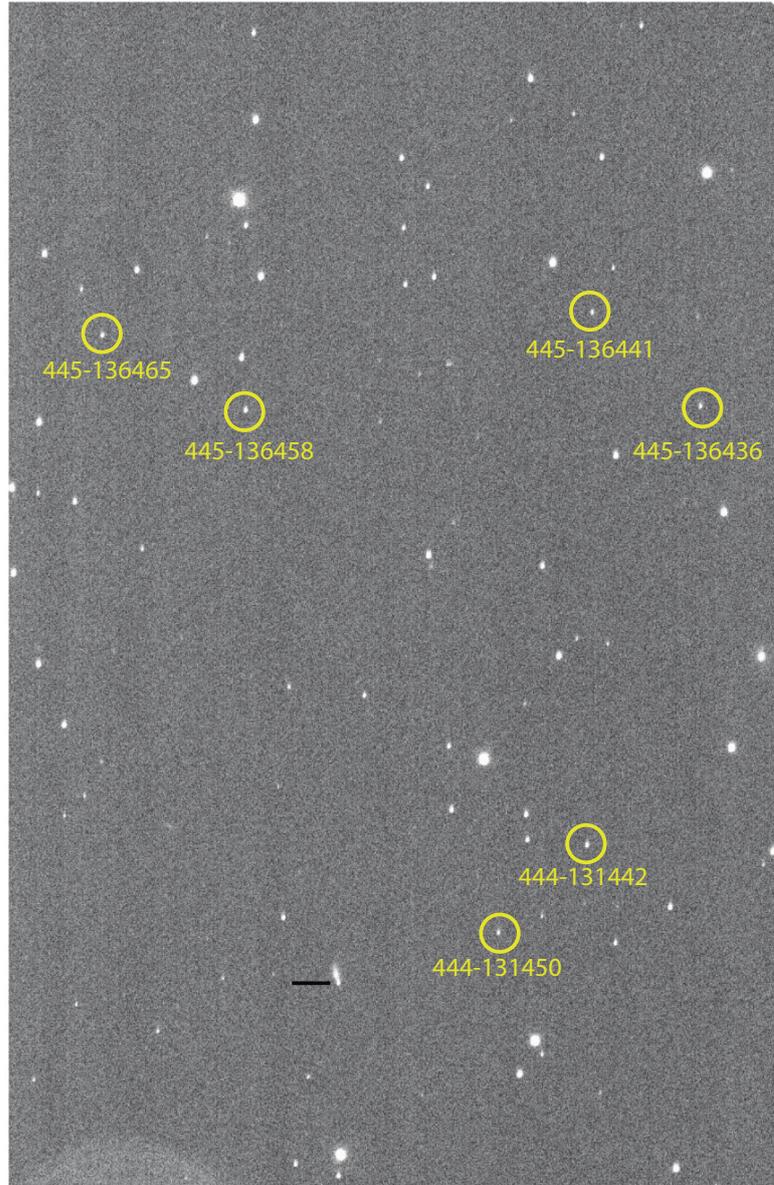


Figura XXXVII: Campo estelar que rodea a la SN AT 2016eqb, donde se muestran los nombres de las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla XVII.

Usando los datos de la tabla XVII se determinó el valor corregido del brillo de la SN usando los 2 métodos de calibración. En primer lugar, de las ecuaciones (ec. 10 y 11) que corresponden al primer método se obtuvieron las constantes que se muestran en la tabla XIX. Asimismo, en la tabla XIX se muestra las constantes que se obtuvieron al calibrar el brillo de esta SN por el segundo método por medio de las ec. 13 y 14.

En segundo lugar, usando los datos de la tablas XVIII y XIX junto a las ec. 10, 11, 13 y 14 se obtuvieron los resultados de los dos métodos de corrección para la magnitud de la SN

Tabla XVIII

Coeficientes del método de calibración m_1
de la SN AT 2016eqb

Día	v_0	r_0
09/08/2016	-1.126 ± 0.208	-0.171 ± 0.043

estudiada, como se muestran en la tabla XX. En esta tabla se puede apreciar que los brillos de la SN en ambos filtros resultaron ser muy similares en ambos métodos. Debido a este hecho es que el valor del color $V-R$ es muy cercano al 0.

Tabla XIX

Coeficientes del método de calibración m_2
de la SN AT 2016eqb

Día	09/08/2016
v_0	-3.370 ± 0.109
v_1	1.108 ± 0.098
v_2	-0.276 ± 0.396
r_0	-0.798 ± 0.097
r_1	0.983 ± 0.150
r_2	-0.079 ± 0.205

Tabla XX

Magnitudes calibradas y color $V-R$
de la SN AT 2016eqb

Día	09/08/2016
V_{m_1}	15.806 ± 0.046
R_{m_1}	15.806 ± 0.046
V_{m_2}	15.847 ± 0.046
R_{m_2}	15.863 ± 0.046
$V-R$	-0.016 ± 0.001

Los valores de la tabla XX se usaron en conjunto con los datos obtenidos por el grupo ASASSN para evaluar gráficamente el comportamiento de esta SN con respecto al template de Nugent en el filtro V como se muestra en la figura XXXVIII.

Debido a que la fecha del máximo de brillo de la SN AT 2016eqb es bien conocida [8], hemos utilizado el método del menor residuo para determinar únicamente el valor de m_0 .

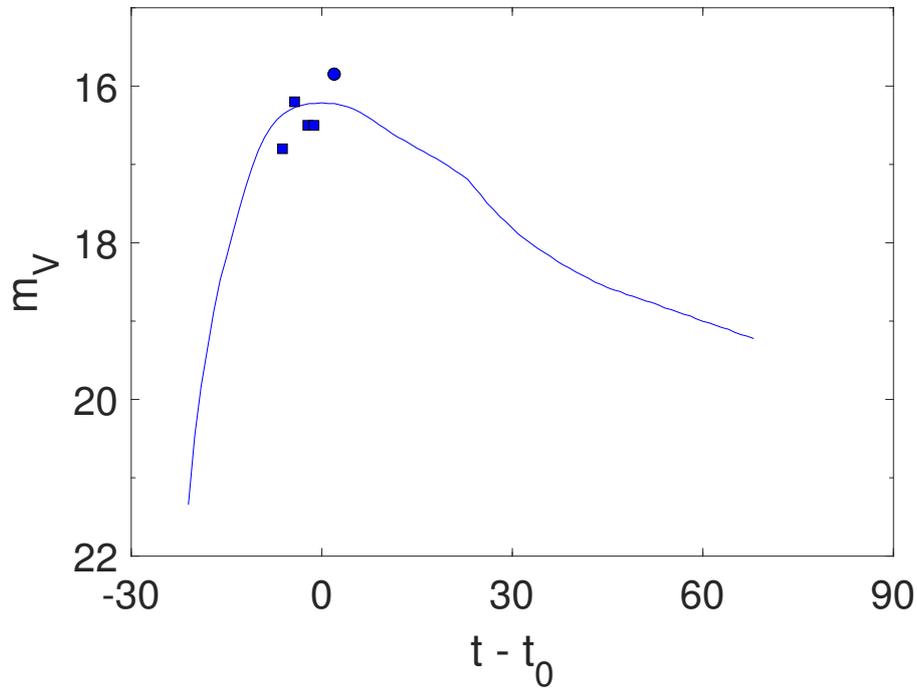


Figura XXXVIII: Curva de luz de la SN AT 2016eqb en el filtro V . *Template* de una curva de luz para una SN de Tipo Ia (línea azul) [49], junto con datos de ASASSN (cuadrados azules) [50] y datos de OUANI m_2 (punto azul, tabla XX). Offsets temporal $t_0 = 2457607.5$ JD.

El ajuste se realizó a un *template* de Nugent de una SN tipo Ia en el filtro V debido a su clasificación espectral era de una SN del mismo tipo. Luego, para graficar este *template* junto con los datos de m_2 de OAUNI y los datos ASASSN también tuvimos que sustraerles la contribución del *redshift* de su galaxia hospedera ($z = 0.02531 \pm 0.00015$). Como todos los datos presentan fechas cercanas al pico, todos ellos fueron usados para determinar el valor de m_0 . La figura XXXVIII muestra la fotometría OAUNI de AT 2016eqb junto con los datos de la literatura disponible y el *template* de Nugent en filtro V con las correcciones $t_0 = 2457607.5$ JD y $m_0 = 16.2130$ mag adecuadas. De la figura XXXVIII se observa que el valor del brillo de la SN obtenido por el OAUNI sigue la tendencia del *template*, así como el resto de los puntos. La importancia de este resultado se basa en que en las fechas próximas al día de la explosión es usual experimentar una alta dispersión de datos debido a que el proceso de explosión de

una SN no es homogéneo ni instantáneo. Por lo tanto, este hecho nos permite verificar que se obtuvieron valores acordes a lo esperado y que el proceso de reducción y el método de transformación de magnitudes fueron los correctos.

Por otro lado, se usó el color $V_{m_2} - R_{m_2}$ de esta SN en un diagrama color-color con la finalidad de establecer un rango de valores que podría haber presentado su color $R-I$. Esta aproximación se realizó con la finalidad de predecir el brillo en el filtro I de esta SN el día 9 de agosto del 2016.

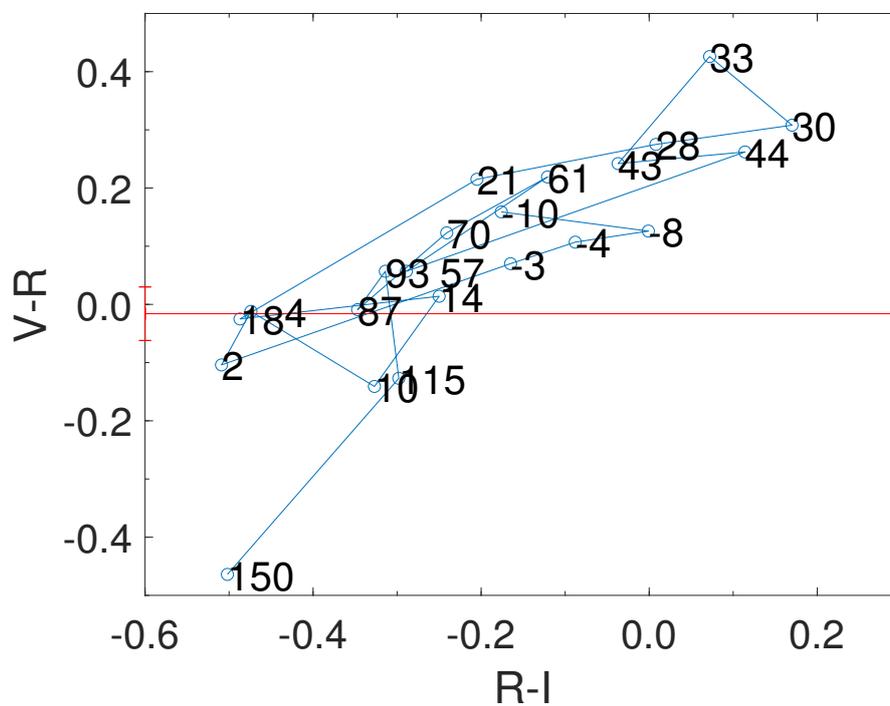


Figura XXXIX: Diagrama $V-R$ vs. $R-I$ para una SN de Tipo Ia con $z = 0$ (línea azul, adaptado de [40]), junto a los posibles valores que puede tener la SN AT 2016eqb (recta roja) Los números indican días después del máximo de luz.

De la figura XXXIX se muestra el diagrama color-color para la SN tipo Ia [40] que se usó como referencia. Esto nos permitió graficar una recta del color $V_{m_2} - R_{m_2}$ de la SN AT 2016eqb en el diagrama de diagnóstico. En la figura XXXIX observamos como la intersección se encuentra entre la recta delimitada por los valores registrados entre los días 2 y -3 de la SN de referencia [40]. Esto nos indica que el color $R-I$ se encontraría en un rango de entre -0.165 y -0.509, por lo que usando nuestro valor de R_{m_2} podemos inferir que esta SN presentaba un

brillo entre 16.028 y 16.372 en el filtro *I*.

D. 2017erp

1). Observaciones desde el OAUNI

A partir del reporte de Itagaki [10] el 13 de junio del 2017 acerca del descubrimiento de la SN 2017erp, el OAUNI realizó observaciones las noches del 23 al 30 de julio UT y las noches del 21 al 23 de agosto UT obteniendo imágenes del objeto celeste para el filtro *V* y *R*.

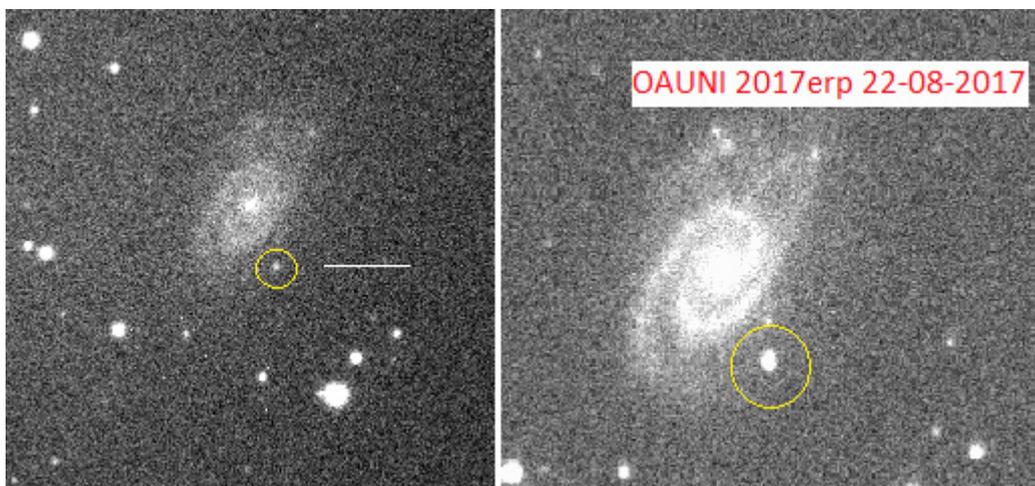


Figura XL: Imagen del descubrimiento de la SN 2017erp por Itagaki el día 13 Junio del 2017 [10] (izquierda) junto a la imagen obtenida desde el OAUNI el día 23 Julio del 2017 (derecha).

Para esta SN se obtuvo y se trabajó con un conjunto de 965 imágenes (tablas XXI, XXII y XXIII) haciendo un total de 5 horas y 42 minutos. En las tablas XXI-XXIII se muestran los datos de las imágenes tomadas del 23 al 30 de Julio y del 21 al 23 de Agosto, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado para la obtención de cada imagen.

Tabla XXI

Registro de observación en los primeros cuatro días de la SN SN2017erp

Día	22/07/2017	23/07/2017	24/07/2017	25/07/2017
Imágenes (V)	45(20s)	45(20s)	45(20s)	45(20s)
Imágenes (R)	45(20s)	45(20s)	45(20s)	45(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (V)	0	30(2.5s)	0	0
<i>Flat field</i> (R)	0	30(3s)	0	0
<i>Darks'</i> (V)	0	30(2.5s)	0	0
<i>Darks'</i> (R)	0	30(3s)	0	0

Tabla XXII

Registro de observación en los siguientes cuatro días de la SN SN2017erp

Día	26/07/2017	27/07/2017	28/07/2017	29/07/2017
Imágenes (V)	45(20s)	45(20s)	45(20s)	45(20s)
Imágenes (R)	45(20s)	45(20s)	45(20s)	45(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (V)	0	0	30(2.5s)	0
<i>Flat field</i> (R)	0	0	30(3s)	0
<i>Darks'</i> (V)	0	0	30(2.5s)	0
<i>Darks'</i> (R)	0	0	30(3s)	0

Tabla XXIII

Registro de observación en los últimos tres días de la SN SN2017erp

Día	20/08/2017	21/08/2017	22/08/2017
Imágenes (V)	45(20s)	20(20s)	60(20s)
Imágenes (R)	45(20s)	15(20s)	60(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	0	30(20s)
<i>Flat field</i> (V)	0	0	30(12s)
<i>Flat field</i> (R)	0	0	30(12s)
<i>Darks'</i> (V)	0	0	30(12s)
<i>Darks'</i> (R)	0	0	30(12s)

En la figura XLI se muestra que la reducción de imágenes fue óptima y que la calidad de las imágenes fue muy buena para el filtro *R*, encontrándose valores para sus desviaciones en el rango de 0.001 mag, mientras que en el filtro *V* sus valores se encontraron alrededor de

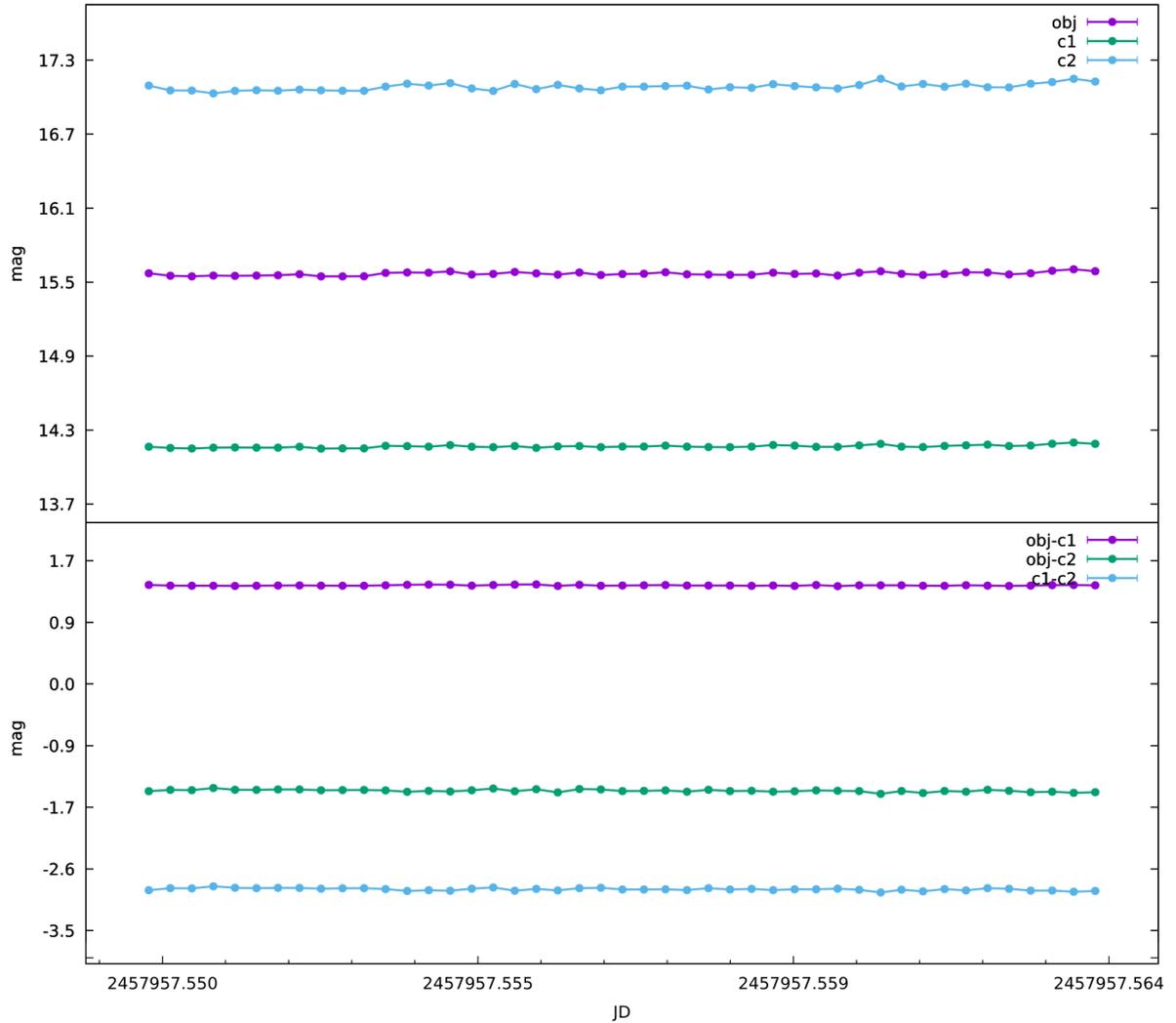


Figura XLI: Control de calidad para los datos de la SN 2017erp obtenida en el OAUNI para el filtro *R* del día 22 de Julio UT.

0.014 mag. Los valores promedios anteriores indican que se pudo lograr una gran estabilidad en las medidas realizadas.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN, se identificó seis estrellas de campo comunes a nuestras imágenes y al catálogo fotométrico UCAC 4, que fueron usadas como estrellas de comparación. Usando estos datos, se seleccionaron las estrellas que aparecen encerrados en un círculo azul en la figura XLII y listados en la tabla XXIV. Además se señala mediante una flecha amarilla la posición de la SN 2017erp en este campo estelar.

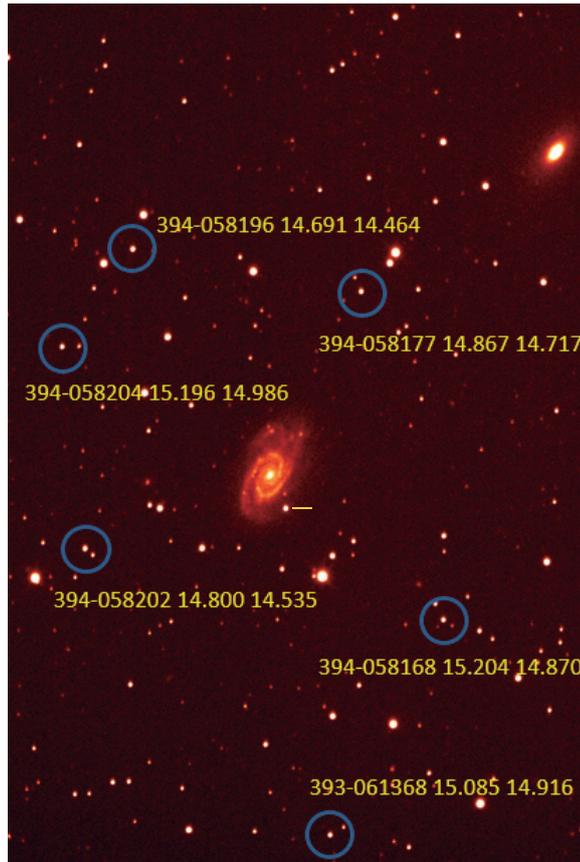


Figura XLII: Campo estelar que rodea a la SN 2017erp, donde se muestran los nombres de las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla XXIV junto a sus magnitudes aparentes calibradas en los filtros V y R , respectivamente.

Tabla XXIV

Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN 2017erp

Objeto	$V_{catalogo}$	$R_{catalogo}$
UCAC4 394-058196	14.691	14.464
UCAC4 394-058202	14.800	14.535
UCAC4 394-058177	14.867	14.717
UCAC4 393-061368	15.085	14.916
UCAC4 394-058204	15.196	14.986
UCAC4 394-058168	15.204	14.870

Usando los datos de la tabla XXIV se determinó el valor corregido del brillo de la SN por 2 métodos. Las constantes que se obtuvieron del primer método se muestran en la tabla XXV, mientras que las constantes de calibración correspondientes al segundo método se muestran en las tablas XXVI y XXVII.

Tabla XXV

Coeficientes del método de calibración m_1
de la SN 2017erp

Día	v_0	r_0
23/07/2017	-1.1425 ± 0.0143	-0.6350 ± 0.0156
24/07/2017	-1.2132 ± 0.0105	-0.7143 ± 0.0156
25/07/2017	-1.2212 ± 0.0105	-0.7307 ± 0.0164
26/07/2017	-1.6048 ± 0.0113	-0.9188 ± 0.0135
27/07/2017	-1.3970 ± 0.0162	-0.7327 ± 0.0169
28/07/2017	-1.2007 ± 0.0136	-0.6733 ± 0.0134
29/07/2017	-1.1400 ± 0.0118	-0.6417 ± 0.0119
30/07/2017	-1.0458 ± 0.0100	-0.5720 ± 0.0115
21/08/2017	-1.2422 ± 0.0095	-0.7178 ± 0.0154
22/07/2017	-1.4847 ± 0.0106	-0.9502 ± 0.0140
23/07/2017	-1.3223 ± 0.0098	-0.7900 ± 0.0125

Tabla XXVI

Coeficientes del método de calibración m_2 de la SN 2017erp
en el filtro V

Día	v_0	v_1	v_2
23/07/2017	0.4267 ± 0.9660	0.9074 ± 0.0607	-0.1045 ± 0.2009
24/07/2017	-0.7309 ± 0.5118	0.9784 ± 0.0312	-0.1831 ± 0.0837
25/07/2017	-0.6504 ± 0.9859	0.9713 ± 0.0594	-0.1482 ± 0.1734
26/07/2017	-1.3692 ± 0.9485	0.9945 ± 0.0673	-0.1597 ± 0.1883
27/07/2017	-0.4667 ± 0.4688	0.9578 ± 0.0637	-0.2669 ± 0.1558
28/07/2017	0.3001 ± 0.6710	0.9165 ± 0.0420	-0.1995 ± 0.1169
29/07/2017	0.1902 ± 0.7321	0.9232 ± 0.0459	-0.1294 ± 0.1344
30/07/2017	-0.0566 ± 0.7175	0.9437 ± 0.0452	-0.1250 ± 0.1492
21/08/2017	-0.2103 ± 0.2977	0.9405 ± 0.0442	-0.0900 ± 0.1256
22/08/2017	-0.7908 ± 0.8934	0.9651 ± 0.0536	-0.1577 ± 0.1372
23/08/2017	-0.5036 ± 0.8687	0.9536 ± 0.0527	-0.0831 ± 0.1577

Usando los datos de la tablas XXV, XXVI y XXVII junto a las ec. 10, 11, 13 y 14 se obtuvieron los resultados de los dos métodos de corrección para la magnitud de la SN estudiada, como se muestran en la tabla XXVIII.

Tabla XXVII

Coeficientes del método de calibración m_2 de la SN 2017erp
en el filtro R

Día	r_0	r_1	r_2
23/07/2017	1.2440 ± 0.6484	0.8761 ± 0.0395	-0.0578 ± 0.1154
24/07/2017	1.2020 ± 0.5988	0.8837 ± 0.0376	-0.0638 ± 0.1240
25/07/2017	1.4400 ± 0.4531	0.8631 ± 0.0669	-0.0722 ± 0.2141
26/07/2017	-1.3692 ± 0.9485	0.9945 ± 0.0673	-0.1597 ± 0.1883
27/07/2017	1.8520 ± 0.8767	0.8342 ± 0.0533	-0.0261 ± 0.1397
28/07/2017	0.3001 ± 0.6710	0.9165 ± 0.0420	-0.1995 ± 0.1169
29/07/2017	0.1902 ± 0.7321	0.9232 ± 0.0459	-0.1294 ± 0.1344
30/07/2017	-0.0566 ± 0.7175	0.9437 ± 0.0452	-0.1250 ± 0.1492
21/08/2017	1.4730 ± 0.5539	0.8583 ± 0.0336	0.0015 ± 0.1028
22/08/2017	0.9980 ± 0.6495	0.8752 ± 0.0389	0.0147 ± 0.1087
23/08/2017	1.0240 ± 0.6009	0.8846 ± 0.0365	-0.0280 ± 0.1151

Tabla XXVIII

Magnitudes calibradas de la SN 2017erp por ambos métodos

Día	V_{m_1}	R_{m_1}	V_{m_2}	R_{m_2}
23/07/2017	14.349 ± 0.014	14.289 ± 0.015	14.424 ± 0.019	14.355 ± 0.022
24/07/2017	14.406 ± 0.011	14.309 ± 0.015	14.442 ± 0.018	14.372 ± 0.019
25/07/2017	14.476 ± 0.011	14.332 ± 0.016	14.502 ± 0.016	14.395 ± 0.022
26/07/2017	14.533 ± 0.013	14.359 ± 0.014	14.544 ± 0.017	14.405 ± 0.016
27/07/2017	14.581 ± 0.018	14.396 ± 0.017	14.611 ± 0.020	14.450 ± 0.013
28/07/2017	14.621 ± 0.014	14.423 ± 0.014	14.656 ± 0.016	14.461 ± 0.016
29/07/2017	14.682 ± 0.012	14.471 ± 0.012	14.706 ± 0.016	14.501 ± 0.015
30/07/2017	14.745 ± 0.011	14.527 ± 0.012	14.759 ± 0.016	14.548 ± 0.015
21/08/2017	15.725 ± 0.014	15.662 ± 0.016	15.695 ± 0.013	15.532 ± 0.010
22/08/2017	15.731 ± 0.026	15.680 ± 0.019	15.733 ± 0.016	15.568 ± 0.014
23/08/2017	15.780 ± 0.016	15.707 ± 0.026	15.755 ± 0.018	15.601 ± 0.010

Debido a la gran cantidad de datos bibliográficos disponibles, utilizamos valores cercanos al pico de las curvas de luz (15 días antes y después del máximo) en ambos filtros (V y R) para ajustar el *template* de Nugent de una SN tipo Ia. Al igual que en la SN anterior, como la fecha del brillo máximo es bien conocida ($t_0 = 2457934.9$ JD, [48]), se utilizó el método del

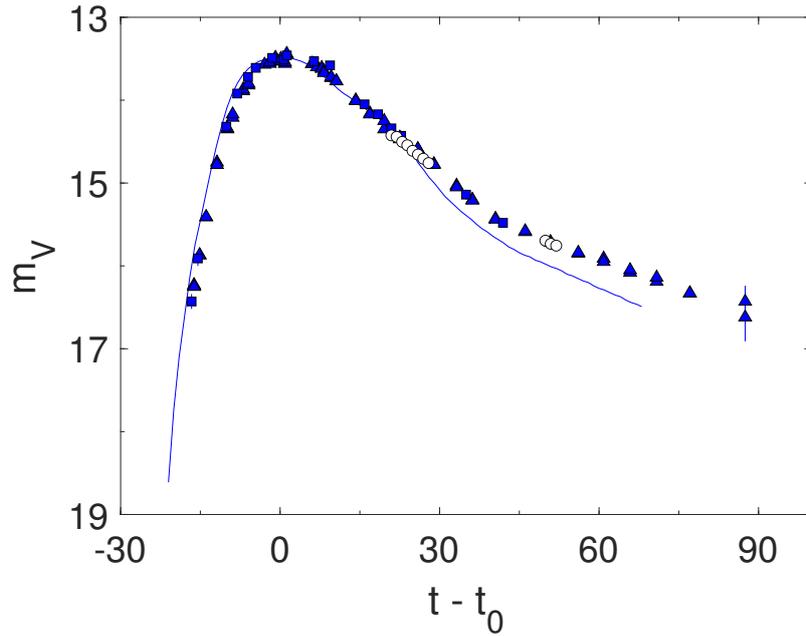


Figura XLIII: Curva de luz de la SN 2017erp en el filtro *V*. *Template* de una curva de luz para una SN de Tipo Ia (línea azul) [49], junto con datos de *UVOT* (cuadrados azules, [14]), datos de *LCO* (triángulos azules, [14]) y datos m_2 de OUANI (puntos blancos, XXVIII). Offset temporal $t_0 = 2457934.9$ JD.

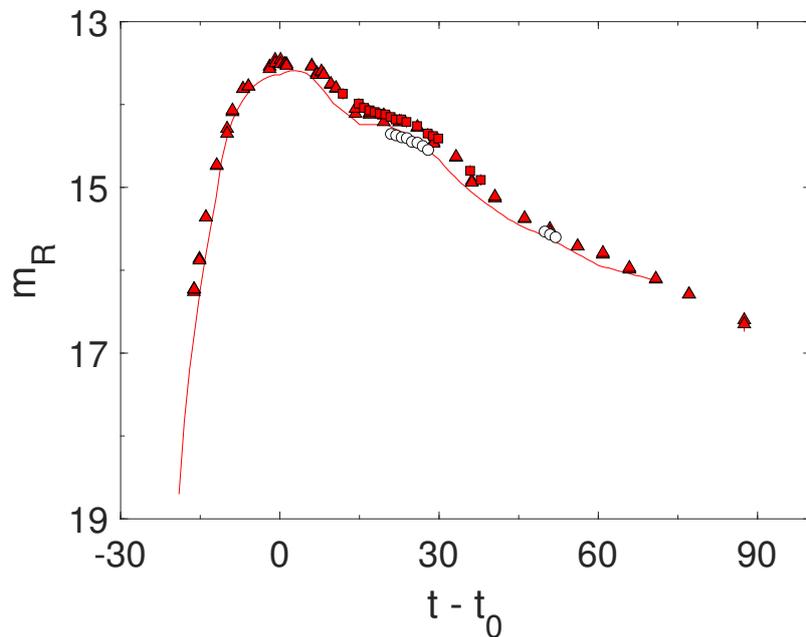


Figura XLIV: Curva de luz de la SN 2017erp en el filtro *R*. *Template* de una curva de luz para una SN de Tipo Ia (línea roja) [49], junto con datos de *AZT* (cuadrados rojos, [14]), datos de *LCO* (triángulos rojos, [14]) y datos m_2 de OUANI (puntos blancos, XXVIII). Offset temporal $t_0 = 2457934.9$ JD.

menor residuo para determinar el m_0 . Teniendo en cuenta el *redshift* de su galaxia hospedera ($z = 0.006303$), obtuvimos los valores $m_0 = 13.4813$ y $m_0 = 13.5922$ para los filtros V y R , respectivamente. Utilizando los datos de la literatura disponibles para la SN 2017erp [48] y datos m_2 de OAUNI (tabla XXVIII), las figuras XLIII y XLIV muestran las curvas de luz en los filtros V y R con sus respectivos templates. Como se puede observar en ambas figuras, los datos de OAUNI coinciden muy bien con los datos de *UVOT*¹⁹, *LCO*²⁰ y *AZT*²¹. Aunque la curva de luz en el filtro V sigue la tendencia del template hasta el día 30, esta diferencia se hace mayor a medida que pasan los días. Por otro lado, la curva de luz en el filtro R sigue la tendencia antes y después del brillo máximo.

3). Parámetro $\Delta m_{15}(B)$

Como se discutió en el marco teórico, el parámetro $\Delta m_{15}(B)$ sirve para caracterizar la curva de luz de la SN. Para calcular este parámetro se usó los datos de la curva de luz histórica en el filtro B [48], además de un ajuste polinomial, para los puntos que corresponden a los 22 primeros días luego del máximo en la figura XLV.

Esto debido a que no se tienen las magnitudes del brillo exactamente en el máximo y en el día +15. Una vez realizado el ajuste, se determinó la diferencia de magnitudes correspondientes al día +15 y al día 0. De esta manera se pudo obtener un valor de $\Delta m_{15}(B) = 1.07 \pm 0.01$ para el ajuste polinomial con un coeficiente de determinación de 0.99.

¹⁹Ultra Violet and Optical Telescope.

²⁰Las Cumbres Observatory.

²¹Observatorio Astrofísico de Shamakhy.

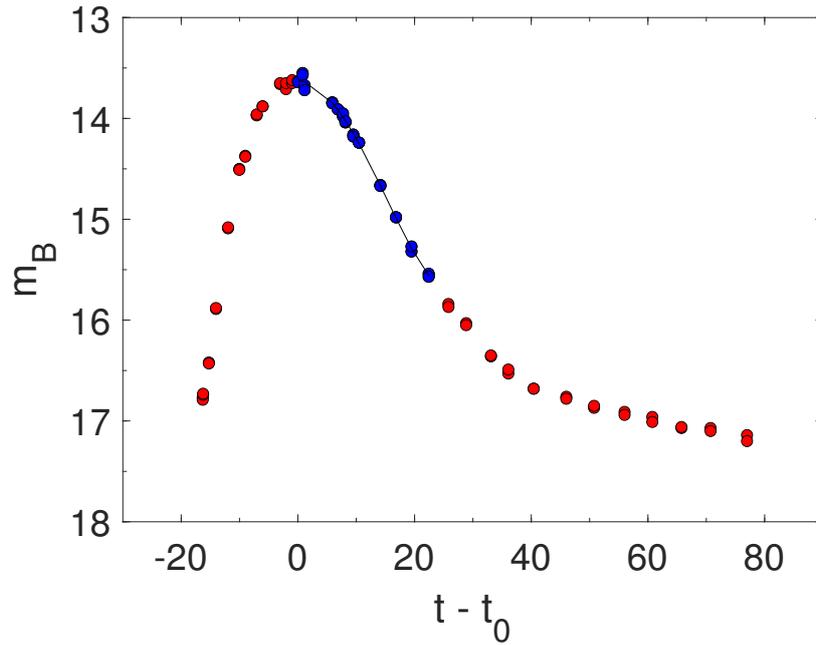


Figura XLV: Curva de luz de la SN 2017erp en el filtro B . Datos de LCO (puntos rojos, [14]) donde se resalta los 15 primeros días luego del máximo (puntos azules). Estos puntos se muestran acompañados de su ajuste polinomial (curva negra). Offset temporal $t_0 = 2457934.9$ JD.

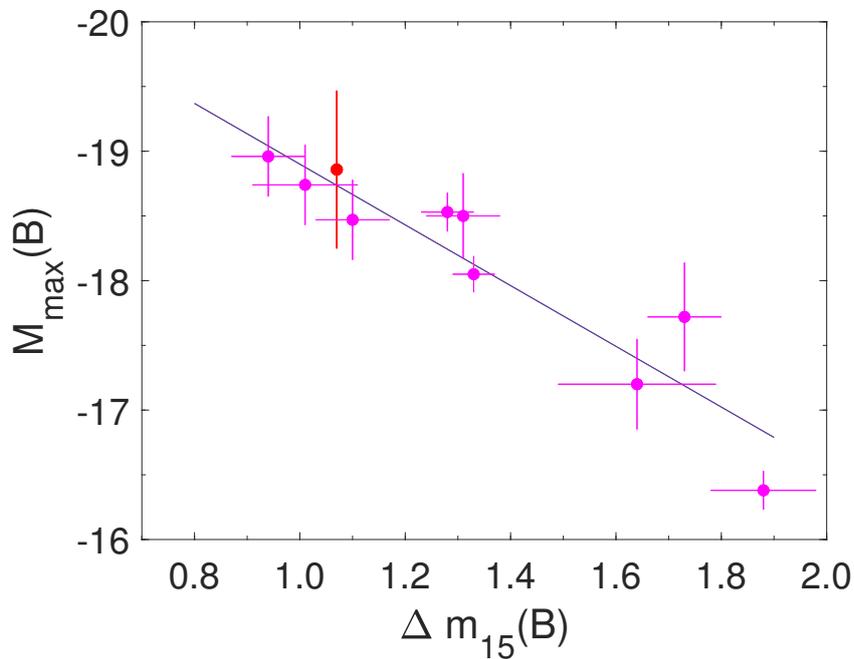


Figura XLVI: Magnitud absoluta en el filtro B vs. $\Delta m_{15}(B)$ donde se comparan las magnitudes de 9 SNe (magenta) [32] y la magnitud de la SN 2017erp (rojo).

A partir de este dato, y usando las ec. 1, 2 y 3, resulta que la SN 2017erp tiene una

magnitud absoluta máxima $M_{max}(B) = -18.85 \pm 0.61$, $M_{max}(V) = -18.80 \pm 0.51$ y $M_{max}(I) = -18.44 \pm 0.50$, en los filtros B , V e I respectivamente. De la figura XLVI se puede observar que la SN 2017erp se encuentra en el grupo de las SNe más brillantes de la muestra usada en [32].

El valor obtenido para el M_{max} también nos ofrece información acerca de la distancia (d) a la que se encuentra la SN, para esto se buscó determinar su módulo de distancia (μ) y mediante su sustitución en la ec. 9, obtener d . Asimismo, para tener un valor más preciso de d , se tomará en cuenta el efecto de la extinción estelar (A) en los distintos filtros. Sin embargo cabe resaltar que debido a que el cálculo de la extinción provocada por la galaxia hospedera de la SN 2017erp escapa a este documento, se tomará en cuenta solo la contribución de nuestra galaxia (La Vía Láctea) en el factor de extinción.

Tabla XXIX

Valores de el modulo de distancia y la distancia relativa de la SN 2017erp para los filtro *B*, *V* e *I*.

Filtro	A	m	μ	d(Mpc)
V	0.296	13.473 ± 0.002	32.27 ± 0.51	24.85 ± 7.00
B	0.391	13.595 ± 0.002	32.45 ± 0.61	25.75 ± 7.23
I	0.162	13.996 ± 0.001	32.44 ± 0.50	28.50 ± 6.56

Para ello se usaron los valores de *A* en cada uno de los filtros (*B*, *V* e *I*) obtenidos de la base de datos *NASA/IPAC*²². Asimismo, las magnitudes aparentes se obtuvieron mediante un ajuste a las curvas de *LCO* en cada filtro, y seleccionando los valores del máximo de brillo. De esta manera, se encontraron la distancias en cada filtro mostradas en la tabla XXIX, resultando en una distancia promedio de 26.37 ± 4.0 Mpc.

4). **Parámetro de *Stretch***

En la figura XLVII también se observa que la curva de luz de la SN 2017erp presenta una caída mas rápida que el *template*, de este hecho podemos afirmar que, en primera aproximación, la SN 2017erp tendrá un parámetro $s < 1$. Como se muestra en esta gráfica, también se usó una aproximación polinomial para obtener el parámetro *s*.

$$\begin{aligned}
 m = & -0,0341(0,009) + 0,006(0,001)t + 7,948(0,074) \times 10^{-3}t^2 \\
 & -2,533(0,047) \times 10^{-4}t^3 + 2,831(0,243) \times 10^{-6}t^4 \\
 & -7,794(4,250) \times 10^{-9}t^5 - 3,276(2,422) \times 10^{-11}t^6
 \end{aligned} \tag{17}$$

Esta aproximación polinomial, dada por la ec. 17, nos ayudó a encontrar el día (p_{15}) de la curva de luz que tuvo la misma magnitud que el día 15 del modelo teórico. De esta manera se encontró que $p_{15} = 14.30 \pm 0.08$ y, usando la ec. 4, se obtuvo un valor de $s = 0.953 \pm 0.005$.

²²NASA/IPAC Extragalactic Database, link:<https://www.ipac.caltech.edu/>

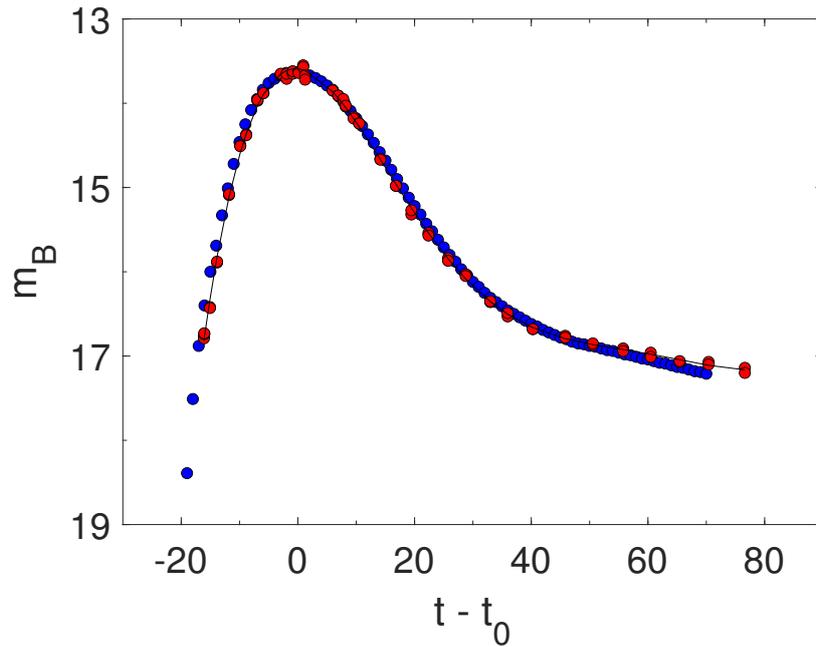


Figura XLVII: Curva de luz histórica existente para el filtro B (puntos azules, [14]) y el modelo teórico de Nugent (puntos rojos, [49]). Se muestra también el ajuste polinómico de grado 6 de la curva histórica. Offset temporal $t_0 = 2457934.9$ JD.

En la figura XLVIII se muestra, primero, el efecto de la corrección debido al tiempo del máximo de brillo (t_0) que representa una traslación en el eje de las abscisas ($t - t_0$). Luego se realizó la corrección por *redshift* según $(t - t_0)/(1+z)$, la cual es despreciable puesto que su valor es del orden de $z = 0.006174 \pm 0.000003$.

Sin embargo la corrección debido al parámetro s según $(t - t_0)/(1+z)s$ resulta apreciable generando una curva que decae ligeramente más rápido que la curva modelo. Con este ajuste, la curva corregida que se observa en la figura XLVIII corresponde a una vela padrón, pues estas correcciones estandarizan a la curva de luz de la SN2017erp.

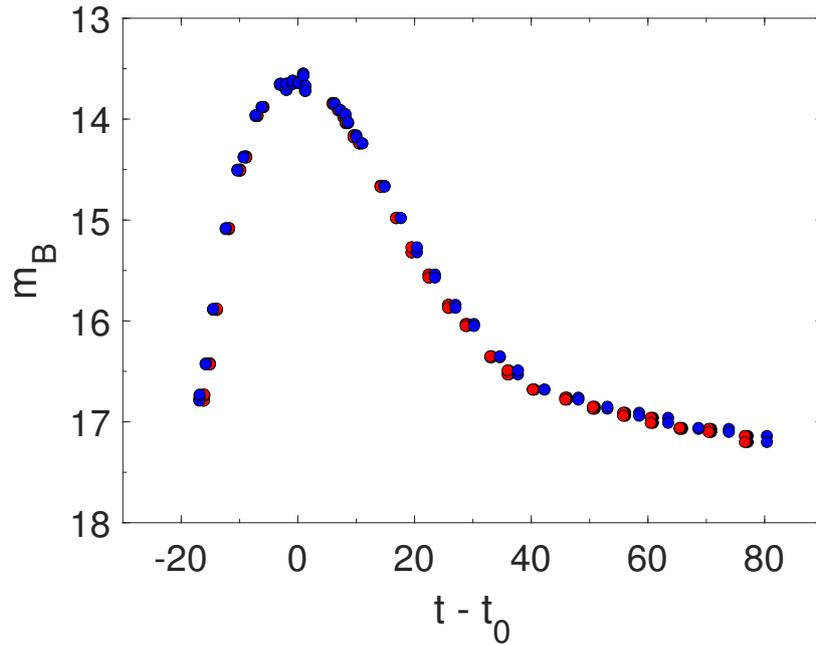


Figura XLVIII: Curva de luz histórica existente para el filtro B [48] con las correcciones debido a su máximo brillo (puntos negros), debido a su *redshift* (puntos rojos) y debido a su parámetro de *stretch* (puntos azules). Offset temporal $t_0 = 2457934.9$ JD.

5). Parámetro de *Stretch-Color*

De manera análoga, a partir de los datos de [14], para los filtros V y B , se pudo encontrar el parámetro de *Stretch-Color* (s_{BV}). Primero, se determinó los valores del color $B-V$ en cada uno de los días que se tiene registro, para luego normalizar los valores de $B-V$ con respecto a su máximo valor, es decir, encontrar los valores de $(B-V)-(B-V)_{max}$ para estos días. Asimismo debido a la falta de datos para los días cercanos al día 30, se realizó una interpolación de datos por el método de *spline cubico*²³.

De esta manera se determinó que la curva interpolada de la figura XLIX alcanza su máximo valor en el día $t_{max} = 29.591 \pm 0.004$. Por lo tanto, usando t_{max} y la ec. 5 resulta en $s_{BV} = 0.9864$ con una incertidumbre de ± 0.0001 . Esto se puede evidenciar fácilmente en la gráfica, debido a que el máximo valor de la curva interpolada (intersección con la recta roja punteada) se encuentra a la izquierda de la recta roja continua.

²³método que usa polinomios de grado 3 para realizar un ajuste de curva por segmentos y que evita las oscilaciones de los ajustes polinómicos.

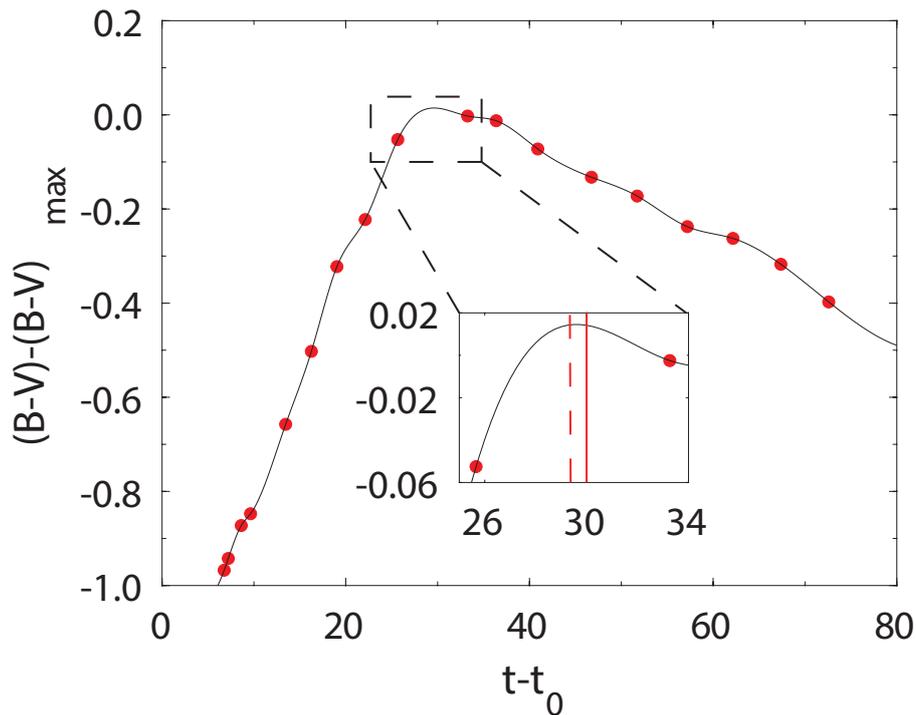


Figura XLIX: Curva $(B-V)-(B-V)_{max}$ vs. t generada a partir de las curvas de luz publicadas en [14] en los filtros B y V . En color negro se muestra el ajuste de curva por el método de spline cúbico desde el día donde se registró el valor máximo de la magnitud aparente en el filtro B hasta los siguientes 80 días. En el zoom se usaron 2 rectas rojas para señalar el día correspondiente al máximo valor del gráfico (punteada) y el día 30 (continua). Offset en el tiempo ($t_0 = 2457936.7$ días) para los datos, con el fin de establecer la fecha de la explosión como el día cero.

Esto sugiere, en primera aproximación, que el valor de s_{BV} resulte < 1 como se mostró en el Cap. 3. Este valor también resulta coherente con los resultados mostrados en [48], donde, mediante el programa *SNOOPY* se encontró un valor de $s_{BV} = 0.9864 \pm 0.0001$.

Posteriormente, y con la finalidad de estudiar con mayor precisión la naturaleza de la SN 2017erp, se usó los valores encontrados de $\Delta m_{15}(B) = 1.07 \pm 0.01$ y $s_{BV} = 0.9864 \pm 0.0001$ para analizar su posición en la figura XVIII. Como se muestra en la figura L se puede apreciar que la SN2017erp sigue muy bien la tendencia que se genera para SNe típicas, demostrando que este evento se puede utilizar como fuente de luminosidad calibrada, lo que permitió establecer la distancia al sistema en el que se encuentra.

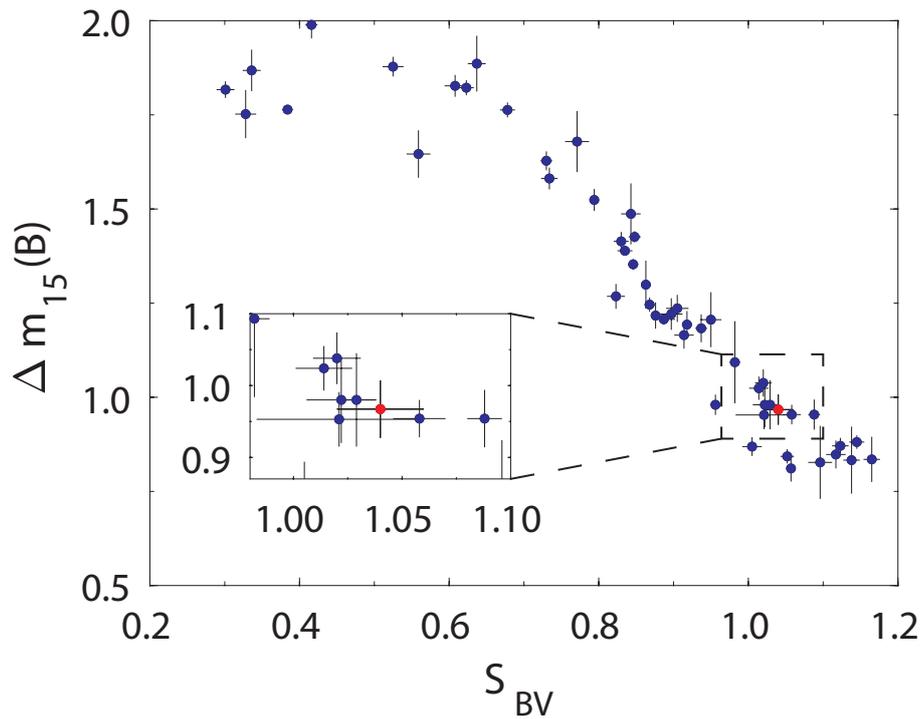


Figura L: s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$ de SNe tipo Ia típicas (puntos azules) [39] junto a la SN 2017erp (punto rojo).

E. AT 2017erv

1). Observaciones desde el OAUNI

A partir del reporte del grupo *ASAS-SN* el 20 de junio del 2017 [17] acerca del descubrimiento de la SN AT 2017erv, el OAUNI realizó observaciones las noches del 26 y 27 de junio UT obteniendo imágenes del objeto celeste para el filtro *R*.

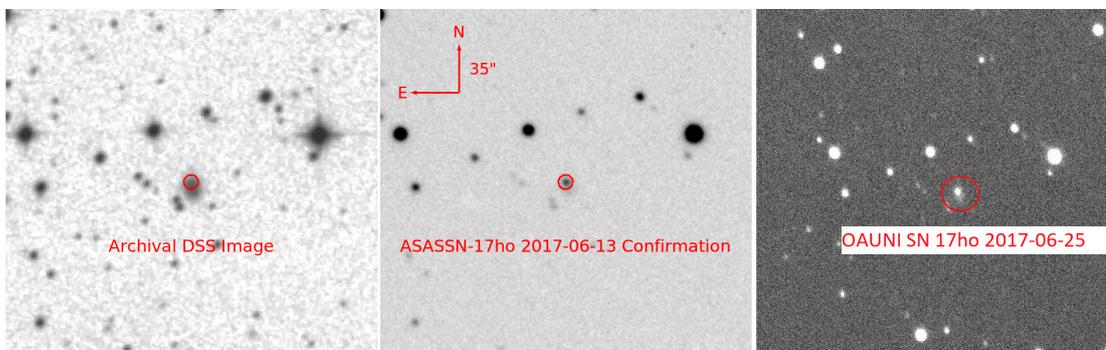


Figura LI: Imagen de la galaxia hospedera AM 1904-844 (izquierda) [17] junto a una imagen de la confirmación del descubrimiento de la SN AT 2017erv por el Dr. B. Nicholls el día 13 Junio del 2017 (en medio) además de una imagen obtenida desde el OAUNI el día 26 Junio del mismo año (derecha).

A partir de estas observaciones, para esta SN se obtuvo y se trabajó con un conjunto de 90 imágenes (tabla XXX). Estas imágenes representan un total de 30 minutos de exposición.

Tabla XXX

Registro de observación de la SN AT 2017erv

Día	26/06/2017	27/06/2017
Imágenes (<i>R</i>)	45(20s)	45(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	30(20s)	0
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	30(20s)	0

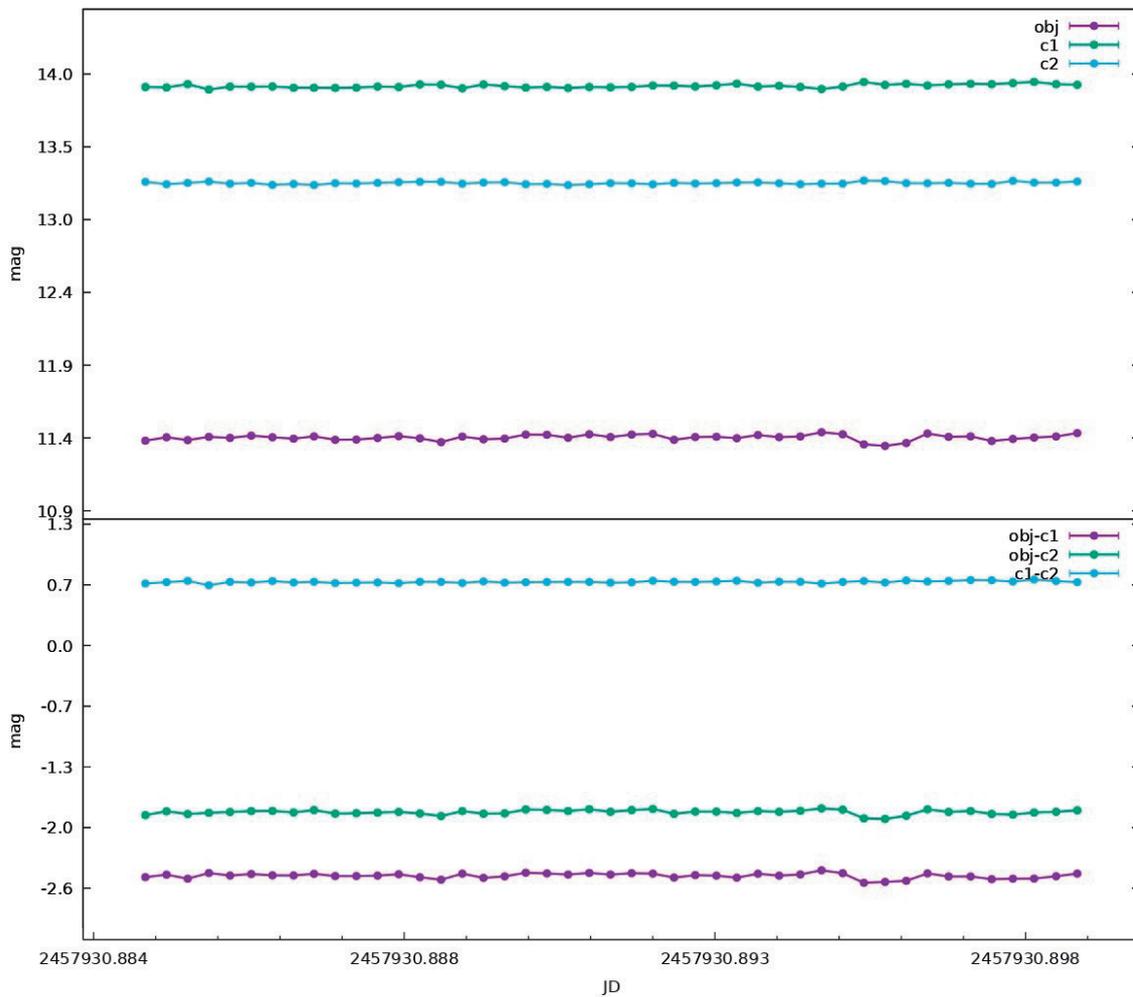


Figura LII: Control de calidad para los datos de la SN AT 2017erv obtenida en el OAUNI para el filtro *R* para el día 26 de Junio UT.

En la tabla XXX se muestran los datos de las imágenes tomadas para los días 26 y 27 de Junio UT, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado para la obtención de cada imagen.

En la figura LII se muestra los subgráficos donde se analizó la calidad de las imágenes obtenidas del telescopio del OAUNI en la noche del 26 de Junio. Mostrando que efectivamente la reducción de imágenes fue óptima y que la calidad de las imágenes fue muy buena para el filtro *R*, encontrándose valores para los promedios de las desviaciones fotométricas en el rango de 0.014 mag en ambos días. Los valores anteriores indican que se pudo lograr una gran estabilidad en las medidas realizadas.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN AT 2017erv, se identificó 16 estrellas de campo comunes a nuestras imágenes y al catálogo fotométrico UCAC 4, que fueron usadas como estrellas de comparación. Usando esta información, se seleccionaron las estrellas que aparecen encerrados en un círculo amarillo en la figura LIII y listados en la tabla XXXI. Además se señala mediante una flecha negra la posición de la SN 2017erv en este campo estelar.

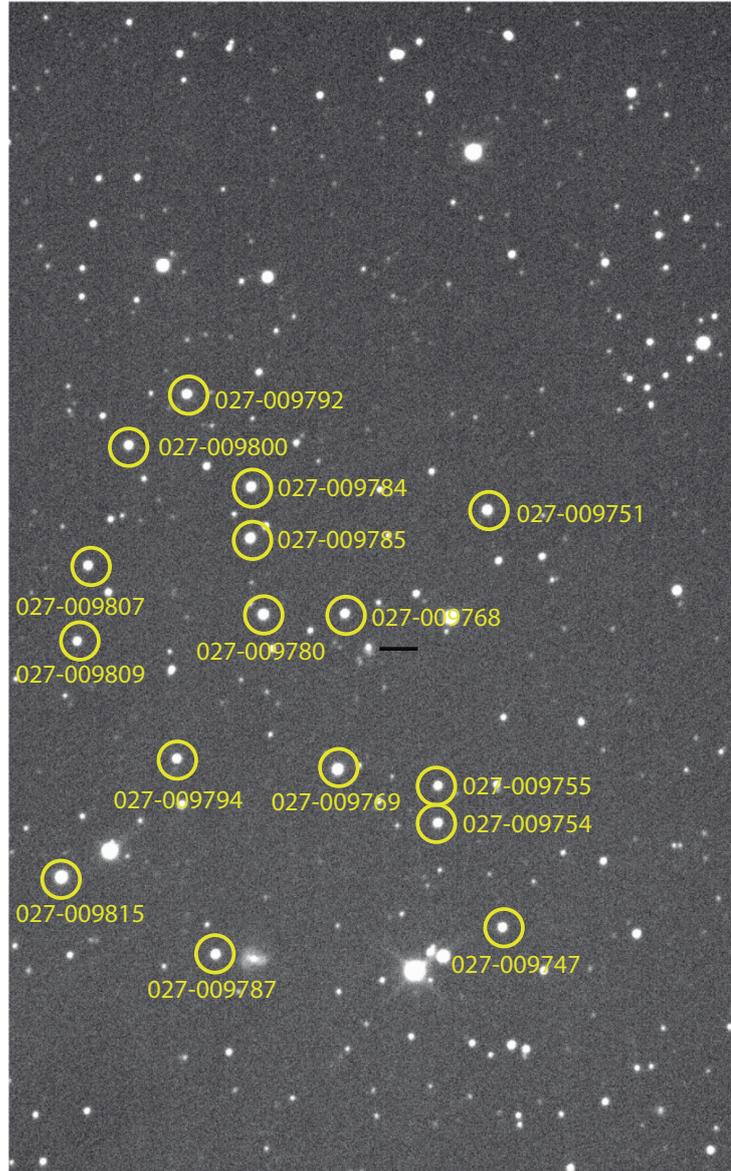


Figura LIII: Campo estelar que rodea a la SN AT 2017erv, donde se muestran las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla XXXI en el filtro R .

Usando los datos de la tabla XXXI se determinó el valor corregido de la magnitud de la SN usando únicamente el método de un único punto cero (m_1).

Esto se debe a que las imágenes de este evento se obtuvieron usando solo un filtro R . Teniendo esto en cuenta, el valor del delta y los valores corregidos que se obtuvieron para esta SN se muestran en las tablas XXXII y XXXIII.

La figura LIV muestra la curva de luz de AT 2017erv con los datos m_1 de OAUNI (tabla XXXIII) y los datos de la literatura disponibles en filtros V y R junto con los *templates* de una

Tabla XXXI

Magnitudes de las estrellas de comparación de la SN AT 2017erv

Objeto	$R_{catálogo}$
UCAC4 027-009815	12.024
UCAC4 027-009769	12.309
UCAC4 027-009780	12.704
UCAC4 027-009785	12.884
UCAC4 027-009751	12.937
UCAC4 027-009784	12.985
UCAC4 027-009787	13.197
UCAC4 027-009792	13.255
UCAC4 027-009754	13.413
UCAC4 027-009747	13.431
UCAC4 027-009800	13.443
UCAC4 027-009768	13.487
UCAC4 027-009794	13.543
UCAC4 027-009807	13.547
UCAC4 027-009809	13.754
UCAC4 027-009755	13.775

Tabla XXXII

Coefficientes del método de calibración m_1
de la SN AT 2017erv

Día	r_0
26/06/2017	-1.048 ± 0.054
27/06/2017	-1.088 ± 0.049

Tabla XXXIII

Magnitudes calibradas por el método m_1
de la SN AT 2017erv

Día	R_{m_1}
26/06/2017	14.349 ± 0.014
27/06/2017	14.406 ± 0.011

SN tipo Ia de Nugent. Usamos información sobre el *redshift* de la galaxia hospedera ($z = 0.017035$) y la fecha del máximo de brillo [17] para ajustar el *template* en el filtro R . Dado

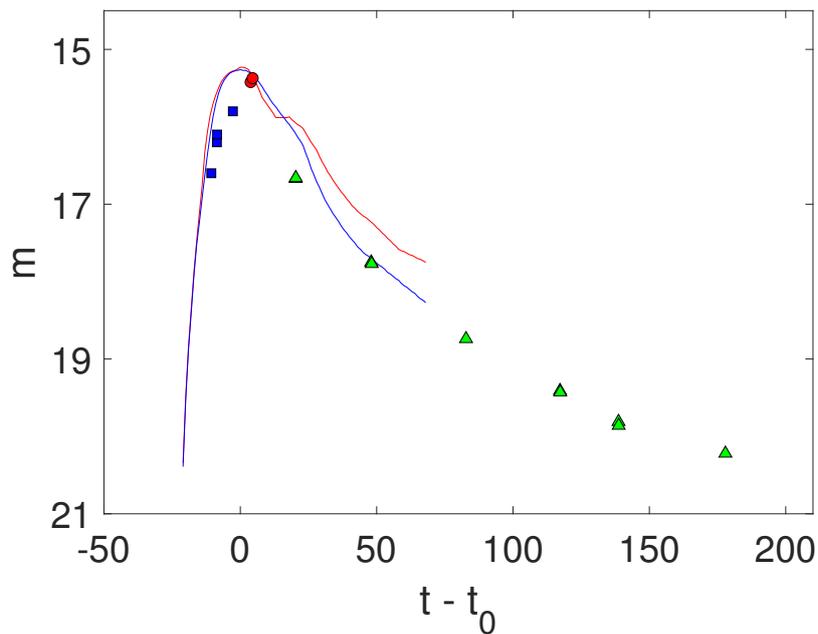


Figura LIV: Curva de luz de la SN AT 2017erv. *Template* de la curva de luz para la SN de Tipo Ia en los filtros V y R (líneas azul y roja, respectivamente, [49]), junto con datos de ASASSN en el filtro V (cuadrados azules, [16]), datos de GAIA en el filtro G (triángulos verdes, <http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/alert/Gaia17bto/>) y datos m_1 de OAUNI en el filtro R (puntos rojos). Offset temporal $t_0 = 2457926.5$ JD.

que los datos de OAUNI están en el filtro R , el *template* en este filtro se usó como referencia para ubicar el *template* en el filtro V . Esta es una característica de la plantilla de Nugent, quien construyó cada *template* con una correlación filtro a filtro. Para ello, determinamos el valor de m_0 reemplazando los datos m_1 de OAUNI en el ajuste polinómico del *template* en el filtro R para encontrar m_0 con el menor residuo ($m_0 = 15.2615$). Luego, como esta SN fue clasificada como una SN Tipo Ia [17], utilizamos el *template* de la curva de luz de una SN Ia de Nugent para compararlo con los resultados de OAUNI en el filtro R (tabla XXXIII) y los valores encontrados por GAIA y ASASSN en los filtros V y G . La figura LIV muestra el resultado del ajuste del *template* de Nugent a los datos m_1 OAUNI del filtro R . Además, podemos observar que los datos de ASASSN presentan un aumento continuo en su brillo antes del pico, mientras que los datos de GAIA muestran una tasa de caída más rápida que la plantilla en el filtro V .

F. AT 2017eve

1). Observaciones desde el OAUNI

Dado que el descubrimiento de la SN AT 2017eve fue emitido en el mismo telegrama del descubrimiento de la SN AT 2017erv, el OAUNI realizó observaciones las noches del 26, 27 y 28 de junio UT obteniendo de la misma manera imágenes para el filtro *R*.

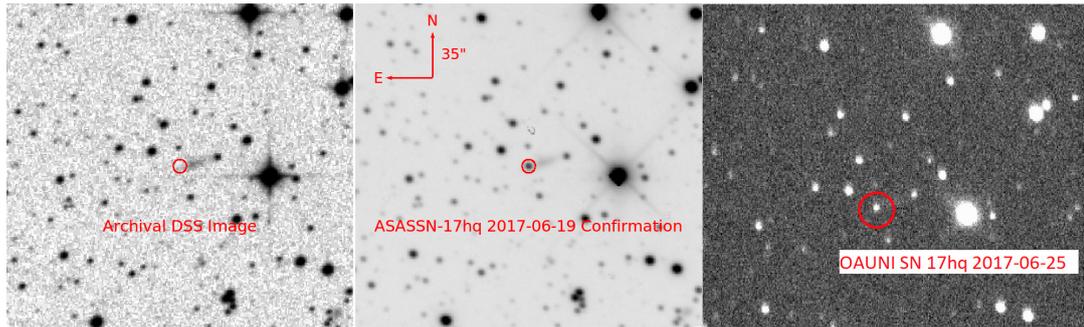


Figura LV: Imagen de la galaxia hospedera GALEXASC J184352.21-562927.7 (izquierda) [17] junto a una imagen de la confirmación del descubrimiento de la SN AT 2017eve por el Dr. J. Brimacombe el día 19 Junio del 2017 (en medio) además de una imagen obtenida desde el OAUNI el día 26 Junio del mismo año (derecha).

En este caso, el OAUNI pudo obtener un total de 180 imágenes de ciencia para esta SN luego de las tres noches de observación (tabla XXXIV), lo que significó una suma de 1h de datos para esta SN. Cabe notar que para el día 28 de junio se realizaron dos secuencias de observaciones con igual tiempo de exposición.

Tabla XXXIV

Registro de observación de la SN AT 2017eve				
Día	26/06/2017	27/06/2017	28/06/2017 (sec. 1)	28/06/2017 (sec. 2)
Imágenes (<i>R</i>)	45(20s)	45(20s)	45(20s)	45(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	30(20s)	0	0	0
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	30(20s)	0	0	0

En la tabla XXXIV se muestran los datos de las imágenes tomadas para los días 26, 27 y 28 (sec. 1 y 2) de Junio, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado

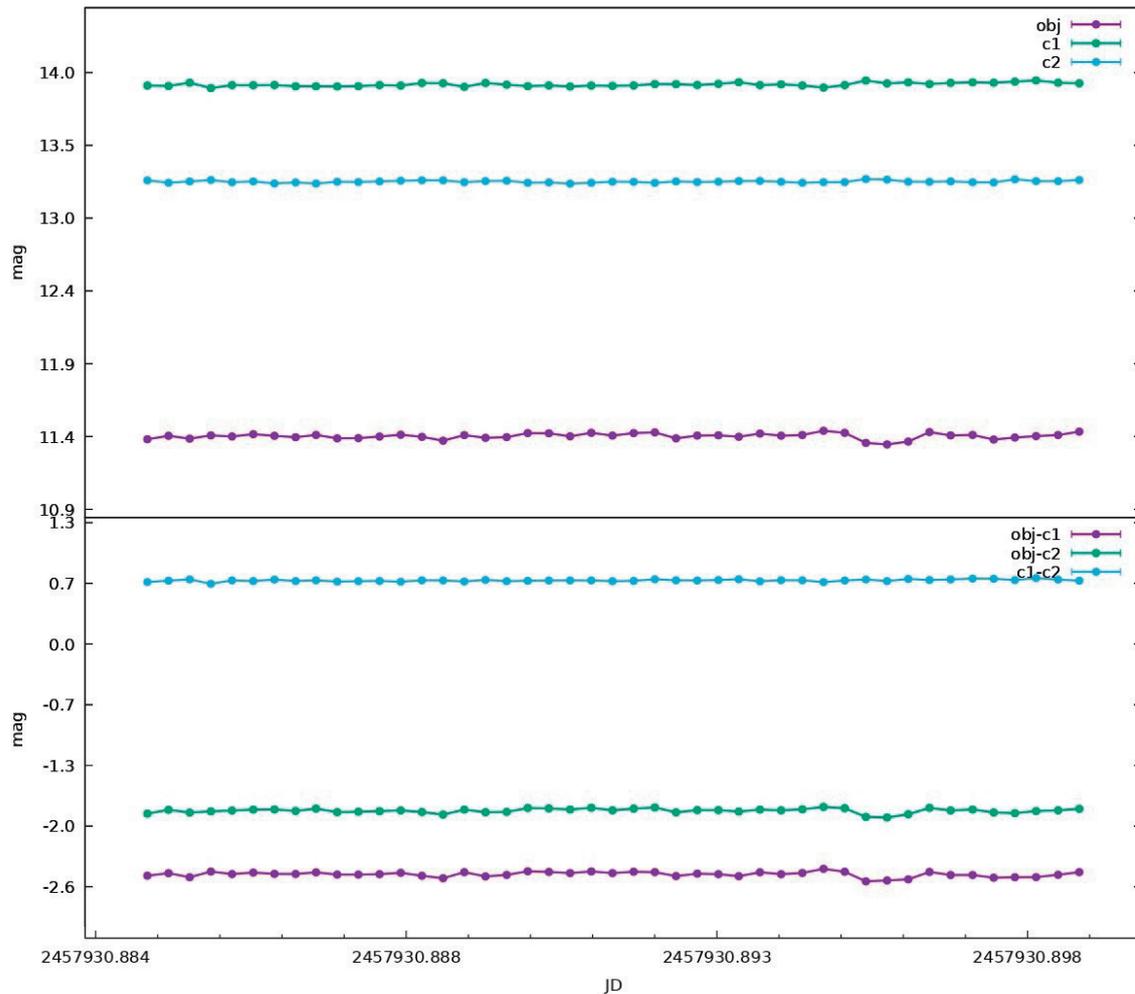


Figura LVI: Control de calidad para los datos de la SN AT 2017eve obtenida en el OAUNI para el filtro R para el día 26 de Junio UT.

para la obtención de cada imagen.

De manera análoga a los casos anteriores, en la figura LVI se muestra los subgráficos que se usaron para evaluar la calidad de las imágenes y la consistencia de sus lecturas para una determinada noche. De esta manera se mantuvo una óptima reducción de imágenes y una buena calidad de imágenes en el filtro R . Para este SN se obtuvo promedios de las desviaciones fotométricas en el rango de 0.007 mag demostrando que se mantuvo la gran estabilidad de las medidas realizadas como en el caso de la SN AT 2017erv.

2). Fotometría

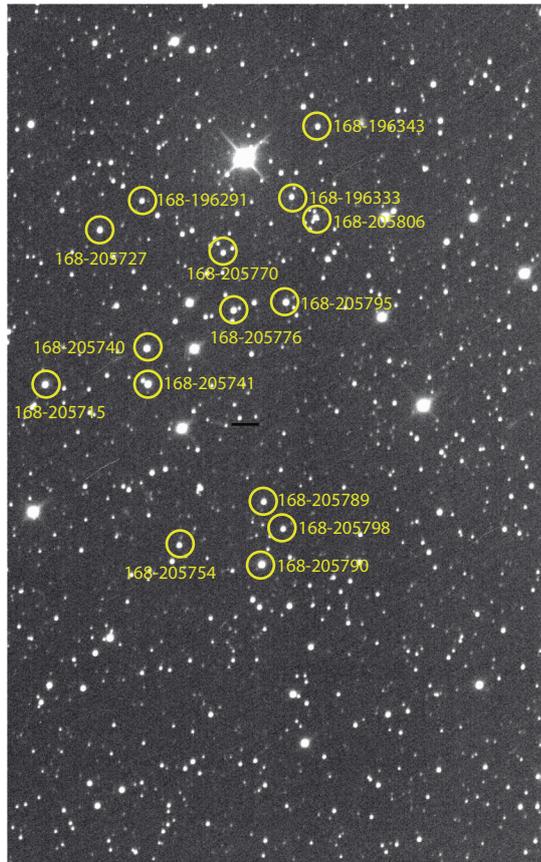


Figura LVII: Campo estelar que rodea a la SN AT 2017eve, donde se muestran las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla XXXV en el filtro R .

Para el campo estelar donde se encuentra la SN AT 2017eve, se identificó y fueron usadas 15 estrellas de comparación que aparecen indicadas en un círculo amarillo en la figura LVII y listados en la tabla XXXV. Además se señala mediante una flecha negra la posición de la SN 2017eve en este campo estelar.

Usando los datos de la tabla XXXV y las ec. 10-11 se determinó el valor corregido del brillo de la SN por el método m_1 . El valor de las constantes y los valores corregidos se muestran en las tablas XXXVI y XXXVII.

Tabla XXXV

Magnitudes de las estrellas de comparación
de la SN AT 2017eve

Objeto	$R_{catálogo}$
UCAC4 168-205741	12.147
UCAC4 168-205790	12.191
UCAC4 168-205740	12.395
UCAC4 168-205715	12.493
UCAC4 168-205795	12.778
UCAC4 168-205776	13.051
UCAC4 168-205727	13.226
UCAC4 168-205789	13.628
UCAC4 168-205806	13.716
UCAC4 169-196343	13.748
UCAC4 168-205754	13.781
UCAC4 169-196291	13.947
UCAC4 168-205770	13.952
UCAC4 168-205798	13.996
UCAC4 169-196333	14.000

Tabla XXXVI

Coefficientes del método de calibración m_1
de la SN AT 2017eve

Día	r_0
26/06/2017	-0.549 ± 0.099
27/06/2017	-0.707 ± 0.102
28/06/2017 (sec. 1)	-0.759 ± 0.109
28/06/2017 (sec. 2)	-0.528 ± 0.107

De manera similar a la SN anterior, hemos empleado los *templates* de Nugent en los filtros *V* y *R*. Utilizando información como su clasificación espectral (SN de Tipo Ia), fecha del máximo de brillo y el *redshift* de su galaxia hospedera ($z = 0.031$). Hemos empleado los datos m_1 de OAUNI (tabla XXXVII) en el método del menor residuo para obtener únicamente el valor $m_0 = 16.6213$ mag. En la figura LVIII, este ajuste nos permite observar la dispersión de los datos del grupo ASASSN alrededor de la fecha del máximo de brillo. Por otro lado los datos de

Tabla XXXVII

Magnitudes calibradas por el método m_1
de la SN AT 2017eve

Día	R_{m_1}
26/06/2017	17.010 ± 0.032
27/06/2017	17.077 ± 0.033
28/06/2017 (sec. 1)	17.144 ± 0.042
28/06/2017 (sec. 2)	17.146 ± 0.038

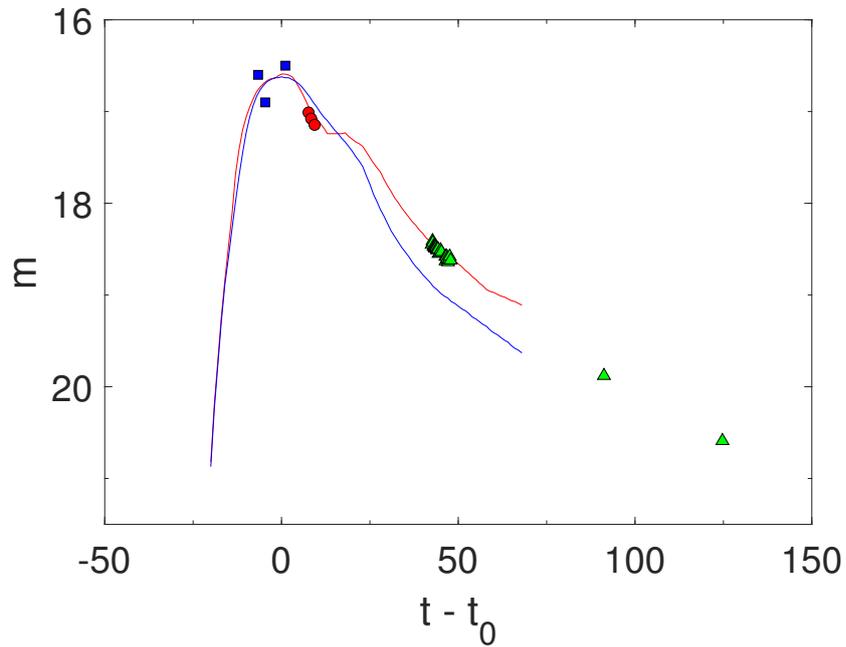


Figura LVIII: Curva de luz de la SN AT 2017eve. *Templates* de la curva de luz para la SN de Tipo Ia en los filtros V y R (líneas azul y roja, respectivamente, [49]), junto con datos de *ASASSN* en el filtro V (cuadrados azules, [16]), datos de *GAIA* en el filtro G (triángulos verdes, <http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/alert/Gaia17byi/>) y datos m_1 de *OAU NI* en el filtro R (puntos rojos, tabla XXXVII). Offset temporal $t_0 = 2457922.5$ días.

GAIA presentan una tasa de caída menor que la plantilla, comportamiento opuesto al de la SN anterior.

G. SN 2023gfo

1). Observaciones desde el OAUNI

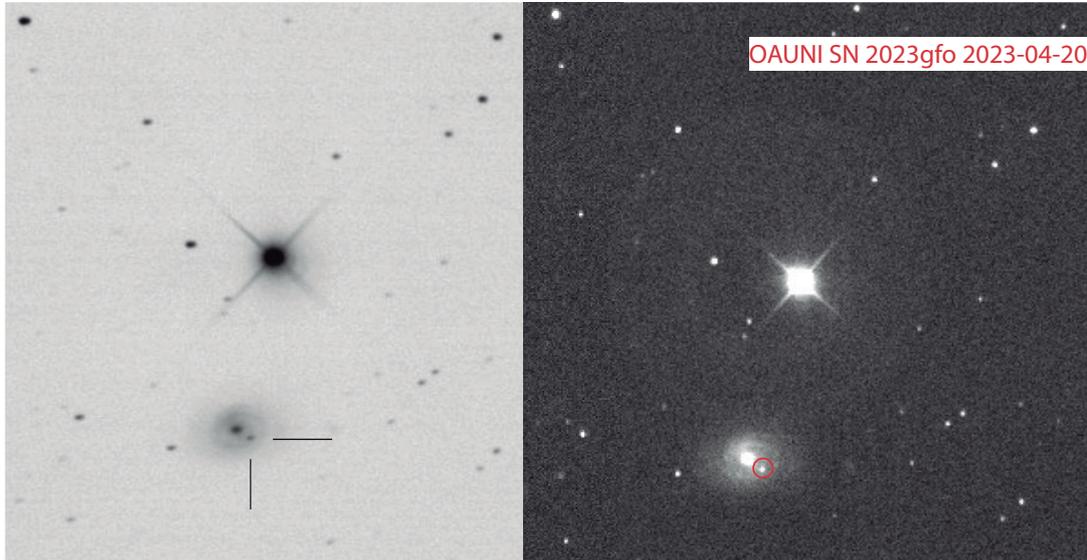


Figura LIX: Imagen del descubrimiento de la SN 2023gfo el día 19 Abril del 2023 UT por el sistema *ATLAS* (izquierda)[18] junto a una imagen obtenida desde el OAUNI el día 24 Mayo del 2023 UT (derecha).

Partiendo del telegrama publicado de la detección de esta SN por el sistema *ATLAS*, el OAUNI se dispuso a comenzar observaciones el 24 de Mayo del 2023. Consiguiendo un total de 1105 imágenes de ciencia (6 horas y 8 minutos de exposición) de esta SN en un periodo de observación de cuatro meses (mayo - agosto) del 2023 (tabla XXXVIII, XXXIX y XL). En estos meses fue posible observar este evento un total de catorce días, resaltando que para la primera fecha de observación se obtuvo una secuencia de imágenes en las que se usaron los tres filtros (*V*, *R* e *I*).

Tabla XXXVIII

Registro de observación de los primeros 5 días de la SN 2023gfo					
Día	24/05/2023	20/06/2023	21/06/2023	14/07/2023	15/07/2023
Imágenes (V)	45(20s)	-	-	-	-
Imágenes (R)	45(20s)	60(20s)	80(20s)	70(20s)	70(20s)
Imágenes (I)	45(20s)	-	-	-	-
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (V)	30(20s)	-	-	-	-
<i>Flat field</i> (R)	30(20s)	-	-	30(3s)	-
<i>Flat field</i> (I)	30(20s)	-	-	-	-
<i>Darks'</i>	30(20s)	-	-	30(3s)	-

Tabla XXXIX

Registro de observación en los siguientes 5 días de la SN 2023gfo					
Día	16/07/2023	17/07/2023	18/07/2023	20/07/2023	21/0/2023
Imágenes (R)	70(20s)	70(20s)	70(20s)	70(20s)	70(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	-	30(20s)
<i>Flat field</i> (R)	-	-	30(2s)	-	30(2s)
<i>Darks'</i> (R)	-	-	30(2s)	-	30(2s)

Tabla XL

Registro de observación de los últimos 4 días de la SN 2023gfo				
Día	16/08/2023	17/08/2023	18/08/2023	19/08/2023
Imágenes (R)	70(20s)	90(20s)	90(20s)	90(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (R)	-	-	30(2s)	-
<i>Darks'</i> (R)	-	-	30(2s)	-

En las tablas XXXVIII, XXXIX y XL se muestran los datos de las imágenes tomadas para las 14 fechas de observación, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros de su correspondiente día. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado para la obtención de cada imagen.

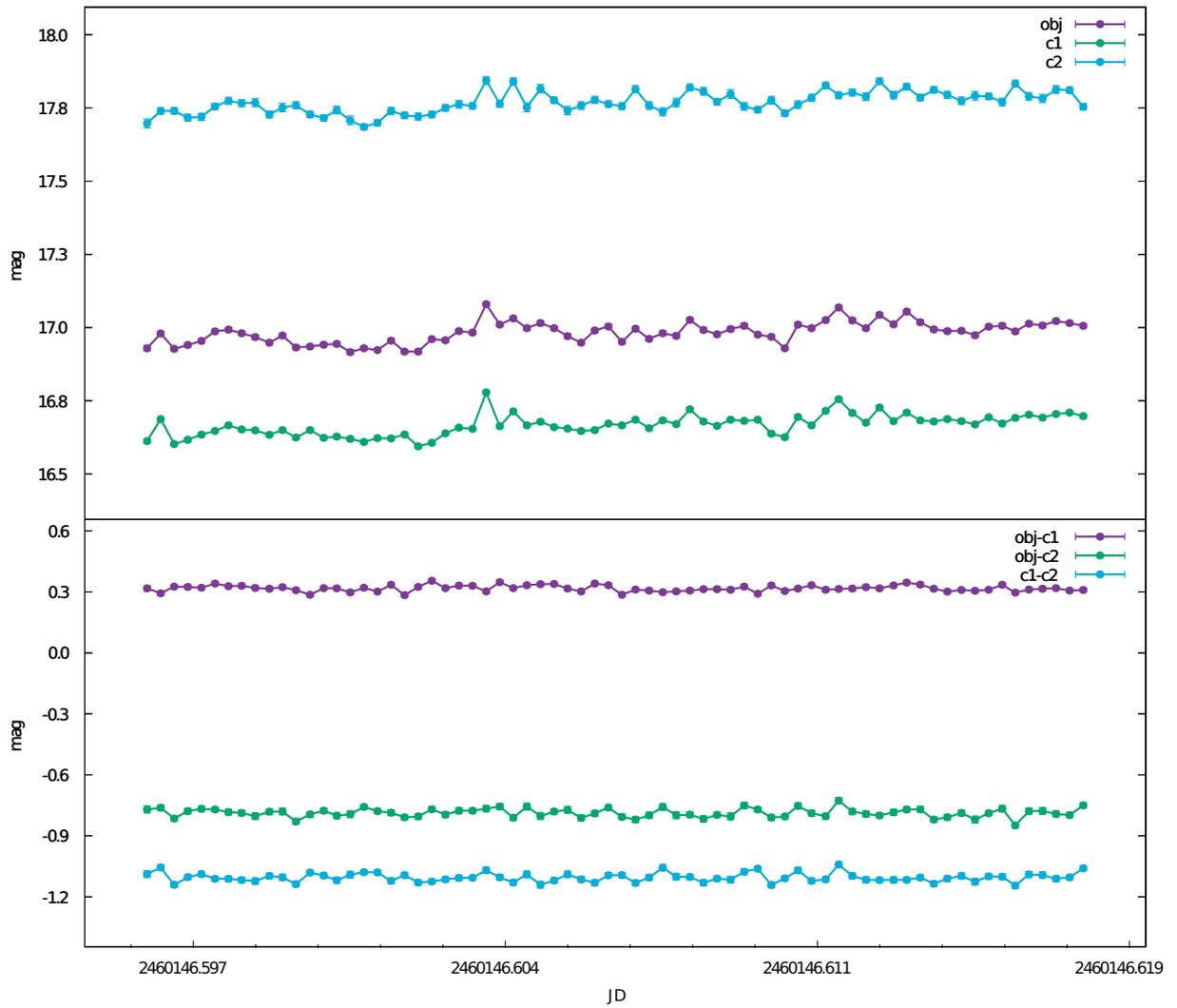


Figura LX: Control de calidad para los datos de la SN 2023gfo obtenida en el OAUNI para el filtro *R* en el día 24 de Mayo UT.

Un ejemplo del registro de la calidad de las imágenes y la consistencia de sus lecturas la figura LX. A esta SN le corresponde promedios de desviaciones fotométricas en el rango de 0.020 mag hasta 0.030 mag para las medidas realizadas, mostrando un margen alto de estabilidad.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN 2023gfo, las seis estrellas de campo comunes a nuestras imágenes y al catálogo fotométrico UCAC 4 se muestran indicadas en un círculo amarillo en la figura LXI y listados en la tabla XLI. Además se señala mediante una flecha negra la posición de la SN 2023gfo en este campo estelar.

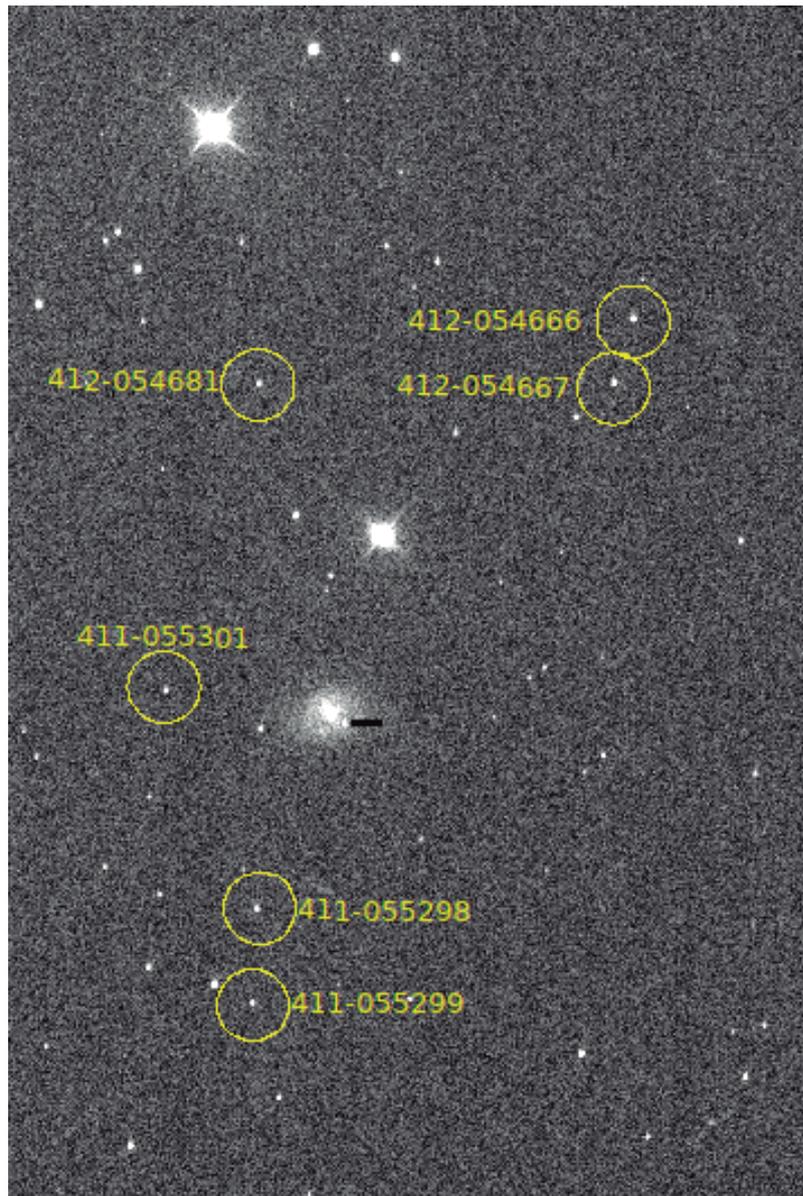


Figura LXI: Campo estelar que rodea a la SN 2023gfo, donde se muestran las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla XLI.

Tabla XLI

Magnitudes de las estrellas de comparación
de la SN 2023gfo

Objeto	$V_{catálogo}$	$R_{catálogo}$	$I_{cataálogo}$
UCAC4 412-054666	14.292	14.114	14.018
UCAC4 412-054667	14.279	14.121	14.030
UCAC4 412-054681	15.068	14.674	14.433
UCAC4 411-055301	15.112	14.930	14.793
UCAC4 411-055298	14.656	14.203	13.907
UCAC4 411-055299	15.053	14.781	14.604

Asimismo, en las tablas XLII y XLIII se muestra las constantes que se obtuvieron tras usar el método de calibración m_1 .

Tabla XLII

Coefficientes del método de calibración m_1 de la SN 2023gfo

Día	v_0	r_0	i_0
24/05/2023	-1.316 ± 0.018	-1.046 ± 0.017	-1.720 ± 0.015
20/06/2023	-	-0.647 ± 0.021	-
21/06/2023	-	-0.647 ± 0.022	-
14/07/2023	-	-0.675 ± 0.018	-
15/07/2023	-	-0.701 ± 0.017	-
16/07/2023	-	-0.753 ± 0.018	-
17/07/2023	-	-0.786 ± 0.016	-
19/07/2023	-	-0.712 ± 0.018	-
20/07/2023	-	-0.764 ± 0.017	-
21/07/2023	-	-0.794 ± 0.015	-
16/08/2023	-	-0.879 ± 0.014	-
17/08/2023	-	-0.836 ± 0.014	-
18/08/2023	-	-0.908 ± 0.011	-
19/08/2023	-	-0.915 ± 0.009	-

Asimismo, usamos los valores encontrados de la SN en los tres filtros distintos de la primera noche para usar el método de calibración que incluyen la dependencia del color de los objetos considerados (metodo m_2).

Tabla XLIII

Magnitudes calibradas por el método m_1 de la SN 2023gfo

Día	V_{m_1}	R_{m_1}	I_{m_1}
24/05/2023	15.716 ± 0.025	15.149 ± 0.022	14.698 ± 0.021
20/06/2023	-	15.417 ± 0.025	-
21/06/2023	-	15.507 ± 0.025	-
14/07/2023	-	15.720 ± 0.025	-
15/07/2023	-	15.616 ± 0.025	-
16/07/2023	-	15.592 ± 0.023	-
17/07/2023	-	15.680 ± 0.025	-
18/07/2023	-	15.431 ± 0.023	-
20/07/2023	-	15.604 ± 0.026	-
21/07/2023	-	15.540 ± 0.024	-
16/08/2023	-	15.106 ± 0.024	-
17/08/2023	-	15.771 ± 0.031	-
18/08/2023	-	15.840 ± 0.033	-
19/08/2023	-	15.439 ± 0.027	-

Tabla XLIV

Coefficientes del método de calibración m_2
de la SN 2023gfo

Constantes	23/05/2023
v_0	0.264 ± 0.275
v_1	0.897 ± 0.018
v_2	0.147 ± 0.061
r_0	0.367 ± 0.339
r_1	0.907 ± 0.022
r_2	0.061 ± 0.070
i_0	-0.867 ± 0.600
i_1	0.948 ± 0.037
i_2	0.076 ± 0.065

Para ello se usaron las ecuaciones 13, 14 y 15. Los valores de las constantes de estas ecuaciones se muestran en la tabla XLIV.

Tabla XLV

Magnitudes calibradas por el método m_2 y colores $V-R$ y $R-I$ de la SN 2023gfo

Día	23/05/2023
V_{m_2}	15.651 ± 0.048
R_{m_2}	15.149 ± 0.042
I_{m_2}	14.721 ± 0.042
$V-R$	0.502 ± 0.090
$R-I$	0.428 ± 0.084

Usando los datos de la tabla XLIV junto a las ecuaciones 13 y 14 se obtuvieron las magnitudes aparentes calibradas por el método m_2 para la SN estudiada, como se muestran en la tabla XLV. En esta tabla, se puede apreciar que los valores obtenidos por ambos métodos resultan similares pues presentan valores que están dentro de sus incertidumbres. En el caso del filtro R , el valor resulto el mismo..

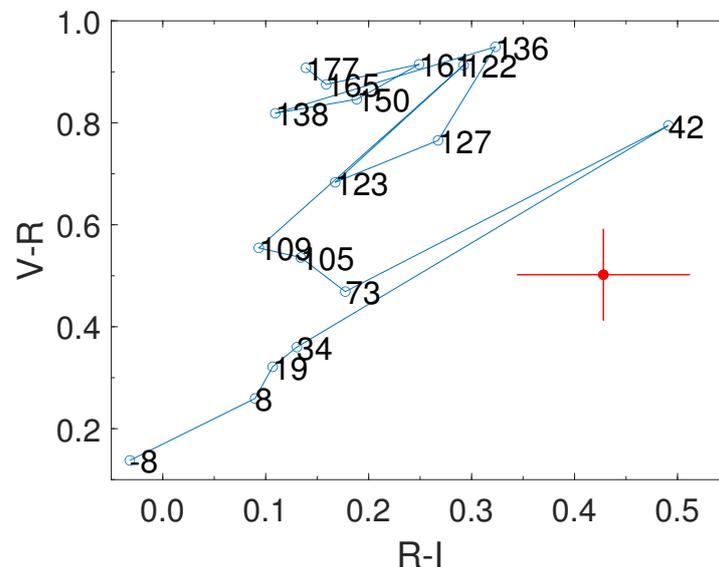


Figura LXII: Diagrama $V-R$ vs. $R-I$ para una SN de Tipo IIp con $z = 0$ (línea azul, adaptada de [40]), junto con los colores de Oauni para la SN 2023gfo utilizando la calibración m_2 (punto rojo). Los números indican los días después del máximo de luminosidad.

Por otro lado, a partir de estas magnitudes aparentes se pudieron generar los colores $V-R$ y $R-I$. Nuevamente se puede apreciar como la cercanía de las magnitudes aparentes dan origen a colores de valores relativamente pequeños

En la figura LXII hemos ubicado los colores $V-R$ y $R-I$ para los únicos datos m_2 de fotometría multicolor OAUNI (ver Tabla XLV) de SN 2023gfo. Su posición en el diagrama de diagnóstico no es lo suficientemente cercana para establecer la época de observación pero sugiere que este SN podría estar entre los días 34 y 42 después del máximo de brillo. Esta suposición está respaldada por el telegrama de su descubrimiento [18], que enfatiza el hecho de que a pesar de que la SN fue descubierto el 19 de mayo, el sistema ATLAS no encontró evidencia de este evento 3 días antes en la misma región.

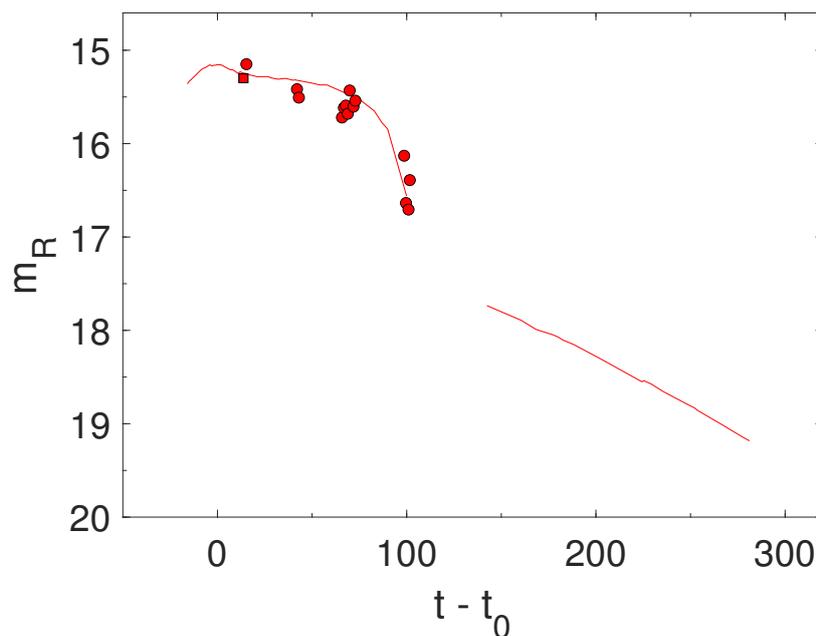


Figura LXIII: Curva de luz de SN 2023gfo en el filtro R . Curva de luz de la SN 2004et (Type IIp) with $z = 0.0002$ (red line, [51]), con el dato de AAVSO (cuadrado rojo, www.aavso.org) junto con los datos m_1 de OAUNI (puntos rojos, tabla XLIII). Offset temporal $t_0 = 2460073.4$ JD.

En la figura LXIII, hemos trazado los datos de la SN tipo IIp 2004et [51] junto con los datos m_1 de OAUNI (ver Tabla XLIII) de cuatro meses consecutivos en el filtro R . Es posible utilizar la curva de luz de la SN 2004et de manera similar a una plantilla ya que sus datos ya han sido corregido respecto a su tiempo de máximo brillo. Por lo tanto, ajustamos la curva de

luz SN 2004et a un polinomio para encontrar el vector de ajuste ($t_0; m_0$). Luego, después de reemplazar los datos m_1 de OAUNI en el ajuste polinómico SN 2004et, obtuvimos el vector ($t_0 = 2460073.4$ JD; $m_0 = 15.1622$ mag) del método de menor residuo. En los primeros tres meses, el OAUNI registró una disminución en la magnitud de aproximadamente 0.6 mag similar a la SN 2004et en el mismo tiempo. Los datos del último mes podrían situar a SN 2023gfo al final de la fase del *plateau*. Al igual que en SN 2004et, en los datos del OAUNI se muestra un aumento en la tasa de caída con respecto a meses anteriores. Por otro lado, la curva de luz sitúa la primera fecha de observación del OANI en el día +15 respecto al máximo de brillo de la SN 2004et en el filtro R . Para comparar este valor con el resultado sugerido por el diagrama de diagnóstico habría que tener en cuenta que el máximo en el filtro B se produce ~ 15 días antes. Esto lo mencionamos debido a que el diagrama de diagnóstico cuenta la fase de un SN usando sus valores en el filtro B . De esta forma la primera fecha de observación sería el día ~ 30 , valor cercano al rango sugerido por el diagrama de diagnóstico.

H. SN 2023ijd

1). Observaciones desde el OAUNI

Luego de recibir la alerta de descubrimiento de esta SN el 14 de Mayo, el OAUNI se dispuso a realizar una campaña observacional de seis días en el mes de Julio del 2023 (tablas XLVI y XLVII). Esta campaña inicio el día 15 de Julio del 2023 UT y concluyó el día 21 del mismo mes obteniendo un total de 420 imágenes para este evento usando un filtro R . Al contar con un tiempo de exposición de 20s por imagen, esto equivaldría a una SN con tiempo de observación de 2 horas y 20 minutos.



Figura LXIV: Imagen del descubrimiento de la SN 2023ijd el día 14 de Mayo del 2023 UT por el grupo ASAS-SN (izquierda, [20]) junto a una imagen obtenida desde el OAUNI el día 15 Julio del 2023 UT (derecha).

En las tablas XLVI y XLVII se muestran los datos de las imágenes tomadas para las seis noches de observación del mes de Julio, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros. Además se muestra entre paréntesis el tiempo de exposición para la obtención de cada imagen.

Tabla XLVI

Registro de observación de las primera 3 noches de la SN 2023ijd

Día	15/07/2023	16/07/2023	17/07/2023
Imágenes (<i>R</i>)	70(20s)	70(20s)	70(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	30(3s)	0	00
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	30(3s)	0	0

Tabla XLVII

Registro de observación de las ultimas 3 noches de la SN 2023ijd

Día	18/07/2023	20/07/2023	21/07/2023
Imágenes (<i>R</i>)	70(20s)	70(20s)	70(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	30(2s)	0	30(3s)
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	30(2s)	0	30(3s)

De manera análoga a los casos anteriores, en la figura LXV se muestra los subgráficos que

se usaron para evaluar la calidad de las imágenes y la consistencia de sus lecturas para una determinada noche. De esta manera se mantuvo una óptima reducción y una buena calidad de imágenes en el filtro *R*. Para este SN se obtuvo promedio de desviaciones fotométricas en el rango de 0.01 mag a 0.04 mag demostrando que se mantuvo la gran estabilidad de las medidas realizadas.

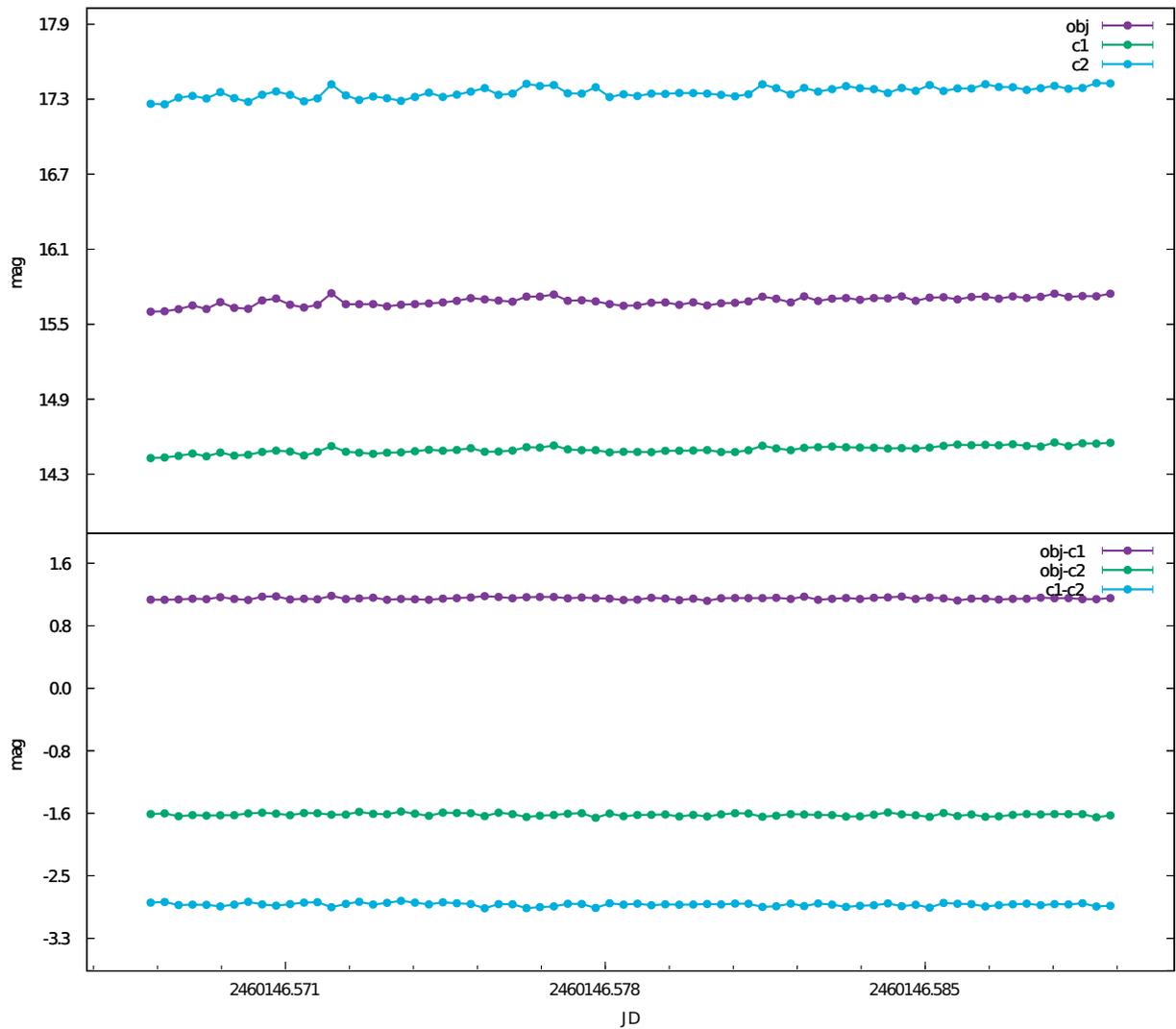


Figura LXV: Control de calidad para los datos de la SN 2023ijd obtenida en el OAUNI para el filtro *R* para el día 15 de Julio UT.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN 2023ijd, se identificó y fueron usadas como estrellas de comparación las seis estrellas que aparecen indicadas en un círculo amarillo en

la figura LXVI y listados en la tabla XLVIII. Además se señala mediante una flecha negra la posición de la SN 2023ijd en este campo estelar.

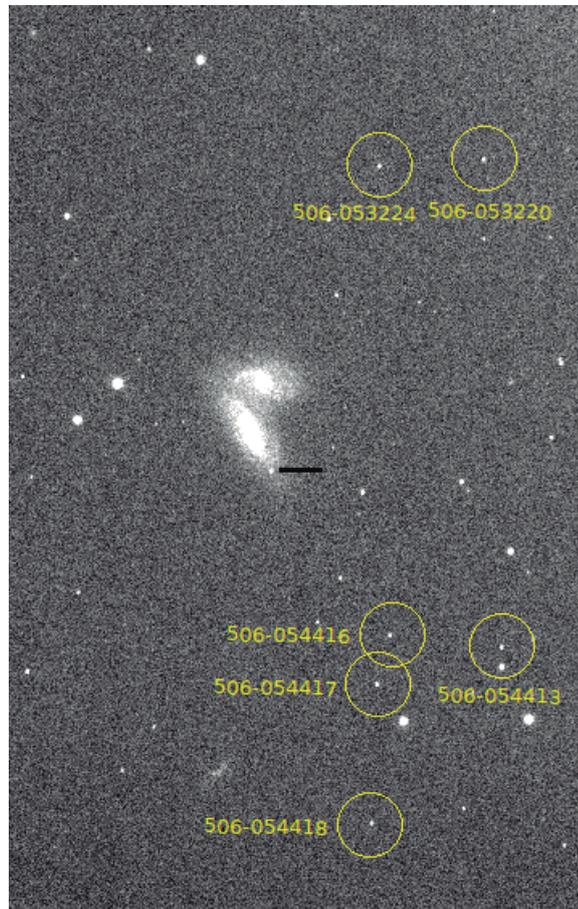


Figura LXVI: Campo estelar que rodea a la SN 2023ijd, donde se muestran las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla XLVIII en el filtro *R*.

Usando los datos de la tabla XLVIII y las ec. 10-11 se determinó el valor corregido del brillo de la SN por el método m_1 . El valor de las constantes y los valores corregidos se muestran en las tablas XLIX y L.

Tabla XLVIII

Magnitudes de las estrellas de comparación
de la SN 2023ijd

Objeto	$R_{catálogo}$
UCAC4 506-053220	15.925
UCAC4 506-053224	15.901
UCAC4 506-054413	16.161
UCAC4 506-054416	15.760
UCAC4 506-054417	15.790
UCAC4 506-054418	16.008

Tabla XLIX

Coeficientes del método de calibración m_1
de la SN 2023ijd

Día	r_0
15/07/2023	-1.006 ± 0.016
16/07/2023	-0.872 ± 0.014
17/07/2023	-0.806 ± 0.013
18/07/2023	-0.907 ± 0.018
20/07/2023	-0.844 ± 0.010
21/07/2023	-0.864 ± 0.011

Tabla L

Magnitudes calibradas por el método m_1
de la SN 2023ijd

Día	R_{m_1}
15/07/2023	15.571 ± 0.022
16/07/2023	15.613 ± 0.018
17/07/2023	15.557 ± 0.018
18/07/2023	15.621 ± 0.022
20/07/2023	15.568 ± 0.013
21/07/2023	15.591 ± 0.018

En la figura LXVII trazamos la curva de luz de SN 2023ijd utilizando datos²⁴ de ZTF (The Zwicky Transient Facility, [52]) y datos m_1 de OAUNI (ver tabla L). Como en el SN anterior de tipo similar, hemos graficado los datos del OAUNI y los datos de ZTF con la curva de luz SN 2004et en el filtro R con $z = 0.0002$ (tipo IIp). Dado que el SN 2023ijd no tiene clasificación espectral, realizamos la comparación con el SN 2004et ya que los puntos presentan un buen ajuste. Para graficar la SN 2004et seguimos los mismos pasos del caso anterior para ajustar su curva de luz a los datos de la SN 2023ijd. En este caso, como se desconoce la fecha del máximo de brillo, utilizamos los datos de ZTF cerca del pico para determinar el vector ($t_0 = 2460099.4$ JD; $m_0 = 15.6157$) con el residuo menor. En la figura LXVII podemos ver como los datos en el rango de +10 a +60 días después del pico exhiben una lenta fase de declive donde

²⁴<https://lasair-ztf.lsst.ac.uk/objects/ZTF23aajrmfh/>

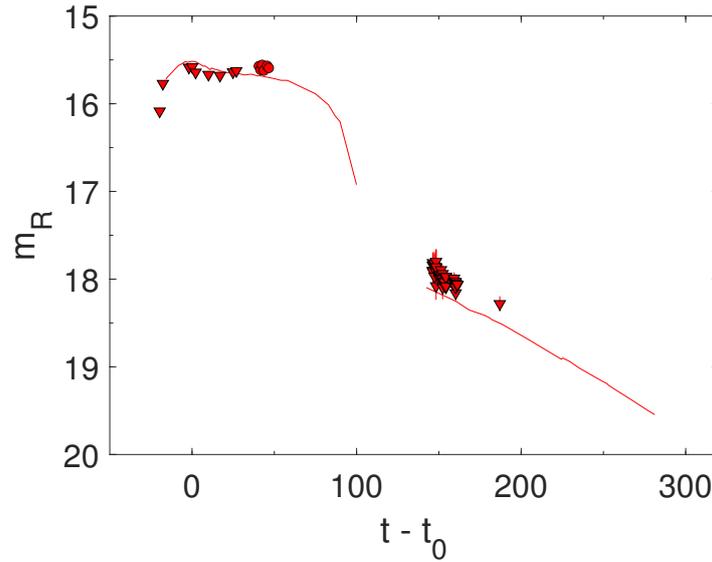


Figura LXVII: Curva de luz de SN 2023ijd en el filtro R . Curva de luz de la SN 2004et (Type IIp) with $z = 0.0002$ (red line, [51]), junto con los datos de ZTF (puntos rojos, <https://lasair-ztf.lsst.ac.uk/objects/ZTF23aajrmfh/>) y los datos de OAUNI (color azul para la calibración m_1). Offset temporal $t_0 = 2460110.2$ días.

presenta una variación de magnitud mínima de ± 0.1 mag. Esta fase de la curva de luz podría haber sido una fase de formación del *plateau* como la SN 2004et.

I. SN 2023ixf

1). Observaciones desde el OAUNI

Una vez publicado el telegrama del Dr. Itagaki sobre la detección de esta SN el OAUNI fijó este evento como objetivo por dos meses (Julio y Agosto). Luego de observarlo un total de 8 noches, se obtuvo 410 imágenes lo que equivale a 2 horas y 16 minutos de tiempo de exposición. En estos meses, se tiene registro de un máximo de seis noches seguidas, las dos noches restantes corresponden a un mes anterior como se muestra en las tablas LI y LII.

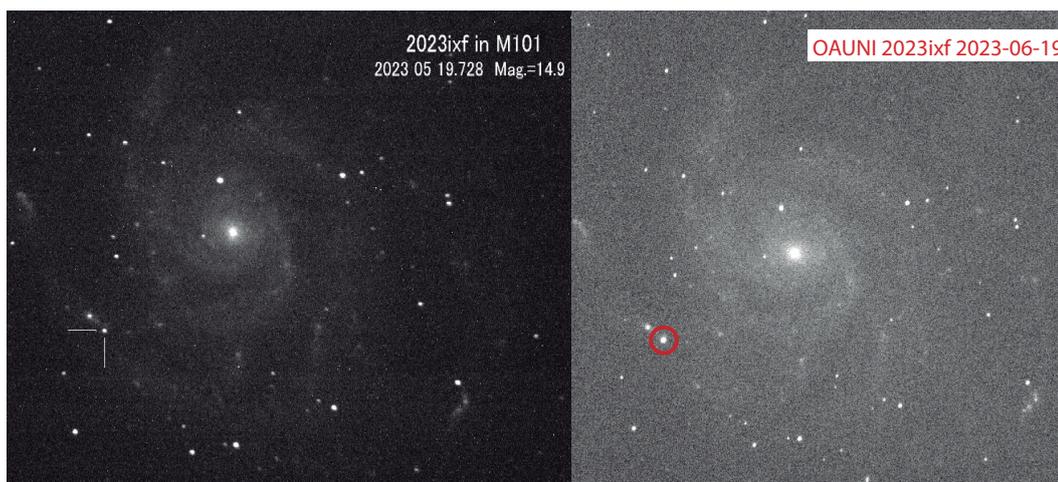


Figura LXVIII: Imagen del descubrimiento de la SN 2023ixf el día 19 Mayo del 2023 UT por el Dr. Itagaki (izquierda, [22]) junto a una imagen obtenida desde el OAUNI el día 20 Junio del 2023 UT (derecha).

Tabla LI

Registro de observación de la SN 2023ixf				
Día	20/06/2023	21/06/2023	14/07/2023	16/07/2023
Imágenes (<i>R</i>)	54(20s)	50(20s)	53(20s)	50(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	30(20s)	-	30(3s)	-
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	30(20s)	-	30(3s)	-

Tabla LII

Registro de observación de la SN 2023ixf				
Día	17/07/2023	18/07/2023	20/07/2023	21/07/2023
Imágenes (<i>R</i>)	50(20s)	50(20s)	53(20s)	50(20s)
<i>Darks</i>	30(20s)	30(20s)	30(20s)	30(20s)
<i>Flat field</i> (<i>R</i>)	-	30(3s)	-	30(3s)
<i>Darks'</i> (<i>R</i>)	-	30(3s)	-	30(3s)

En las tablas LI y LII se muestran los datos de las imágenes tomadas para las ocho fechas de observación, donde las imágenes *Darks* le corresponde a las imágenes de ciencia y las *Darks'* a las imágenes de los filtros de su correspondiente día. Además se muestra entre paréntesis el tiempo empleado para la obtención de cada imagen.

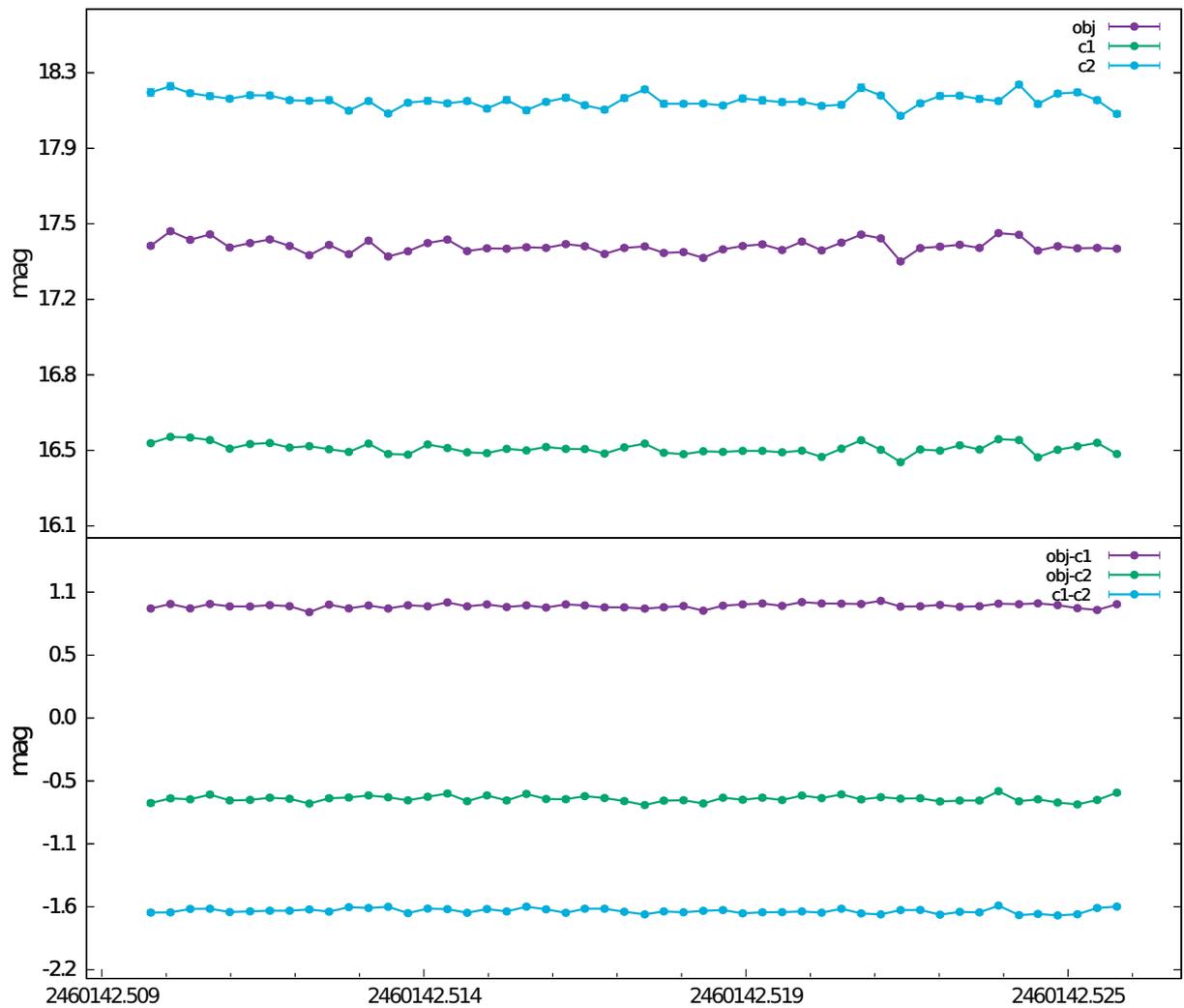


Figura LXIX: Control de calidad para los datos de la SN 2023ixf obtenida en el OAUNI para el filtro R en el día 20 de Junio UT.

Un ejemplo del registro de la calidad de las imágenes y la consistencia de sus lecturas la figura LXIX. A esta SN le corresponde desviaciones promedios fotométricas en el rango de 0.020 - 0.030 mag para las medidas realizadas, mostrando un margen alto de estabilidad.

2). Fotometría

Para el campo estelar donde se encuentra la SN 2023ixf, se identificó y se usaron como estrellas de comparación los seis objetos que aparecen encerrados en un círculo amarillo en la figura LXX y listados en la tabla LIII. Además se señala mediante una flecha negra la posición de la SN 2023ixf en este campo estelar.

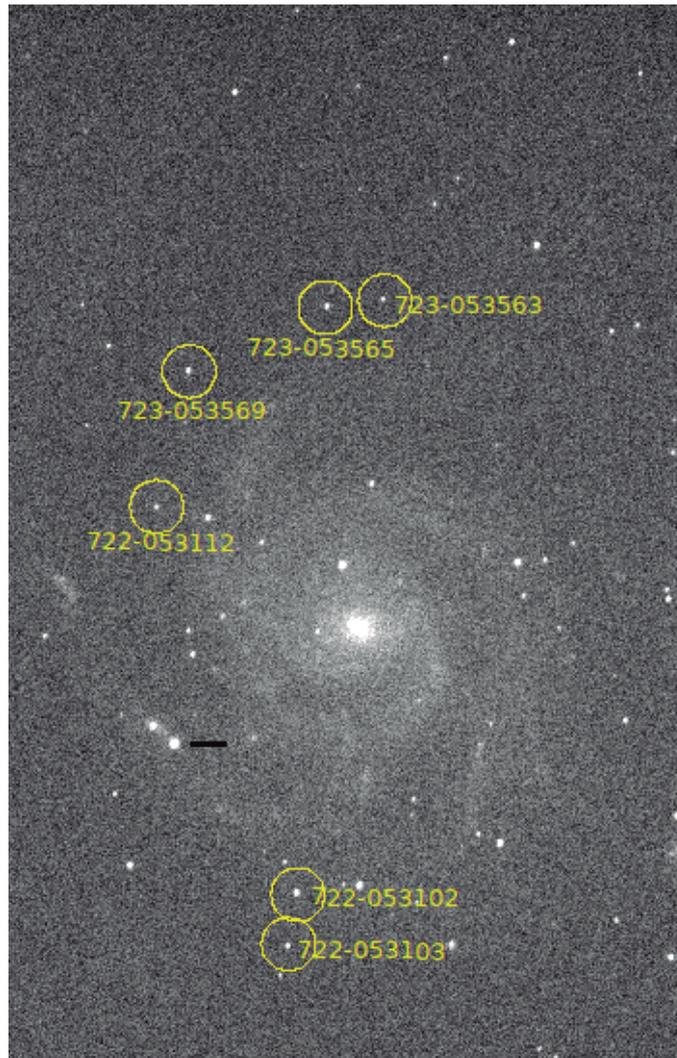


Figura LXX: Campo estelar que rodea a la SN 2023ixf, donde se muestran las estrellas de comparación UCAC4 listadas en la tabla LIII en el filtro *R*.

Tabla LIII

Magnitudes de las estrellas de comparación
de la SN 2023ixf

Objeto	$R_{catálogo}$
UCAC4 723-053563	15.400
UCAC4 723-053565	14.719
UCAC4 723-053569	14.582
UCAC4 722-053112	15.410
UCAC4 722-053102	14.245
UCAC4 722-053103	15.298

Tabla LIV

Coeficientes del método de calibración m_1
de la SN 2023ixf

Día	r_0
20/06/2023	-1.573 ± 0.025
21/06/2023	-1.259 ± 0.023
14/07/2023	-1.666 ± 0.024
16/07/2023	-1.849 ± 0.023
17/07/2023	-1.622 ± 0.029
18/07/2023	-1.434 ± 0.023
20/07/2023	-1.482 ± 0.026
21/07/2023	-1.359 ± 0.027

Tabla LV

Magnitudes calibradas por el método m_1
de la SN 2023ixf

Día	R_{m_1}
20/06/2023	11.285 ± 0.025
21/06/2023	11.301 ± 0.023
14/07/2023	11.635 ± 0.024
16/07/2023	11.606 ± 0.024
17/07/2023	11.600 ± 0.029
18/07/2023	11.690 ± 0.023
20/07/2023	11.704 ± 0.026
21/07/2023	11.714 ± 0.027

Usando los datos de la tabla LIII y las ec. 10-11 se determinó el valor corregido de la magnitud de la SN por el método m_1 . El valor de las constantes y los valores corregidos se muestran en las tablas LIV y LV.

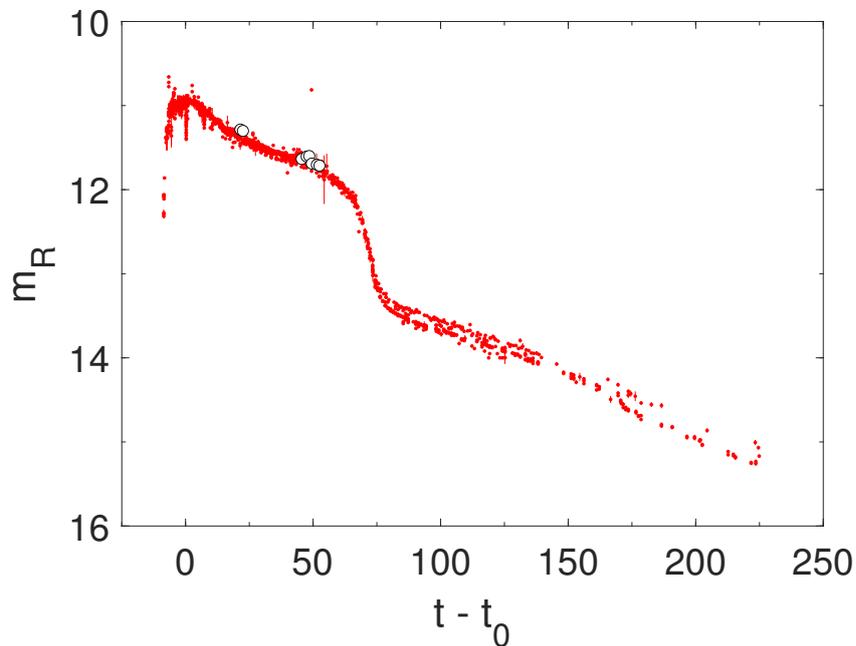


Figura LXXI: Curva de luz de SN 2023ixf en el filtro R . Datos de AAVSO (puntos rojos, <https://www.aavso.org/LCGv2/>) y datos m_1 de OAUNI (puntos blancos, tabla LV). Offset temporal $t_0 = 2460094.0$ JD.

Debido a que la SN 2023ixf es la supernova más cercana actualmente se encontró una

amplia gama de datos disponible de hasta +225 días en AAVSO²⁵. Como es costumbre, corregimos los valores temporales usando el *redshift* de su galaxia hospedera ($z = 0.000811 \pm 0.000016$) e interpolamos la fecha del pico $t_0 = 2460094.0$ JD. Este hecho está respaldado por [25], donde establecen $t_0 = 2460094.2$ JD. Como se ve en la figura LXXI, los datos m_1 de OAUNI (ver tabla LV) en las ocho noches de observación de SN 2023ixf siguen la tendencia de la curva de luz entre los días +0 y +50 luego del pico. Después de estos días la luminosidad presenta un aumento en la pendiente, cayendo de 12 mag a 13.5 mag en 20 días. Finalmente, el SN recupera su lento ritmo de descenso por el resto de su vida. Esto se puede deber a que la SN 2023ixf no es una tipo II-L como se indica en [27] y se estaría tratando de una IIp. Esto por el *plateau* que se estaría formando entre las fechas 40 y 70 posterior al máximo de brillo. Además que durante los primeros 30 días podemos apreciar que la SN presenta una pendiente de caída que se va reduciendo con el tiempo en lugar de una pendiente constante y pronunciada que es la característica principal de las SNe II-L.

²⁵The American Association of Variable Star Observers (AAVSO).

V. Conclusiones

Se realizó con éxito la reducción de las imágenes de las distintas SNe obtenidas con el equipo disponible en el OAUNI. Se verificó la buena calidad de las imágenes para un total de 31 noches en que se observó estas nueve SNe en los filtros V , R e I . Encontrándose valores menores a 0.09 mag para las desviaciones de sus imágenes. La calibración de datos para los métodos m_1 y m_2 se examinó cuidadosamente en cada filtro. Como resultado, la concordancia entre ambos métodos tiene una precisión promedio de 0.096 ± 0.064 .

Para la primera SN, se obtuvo su magnitud calibrada por medio de dos métodos debido a que fue observada usando tres filtros distintos. Esto fijó un menor número de estrellas de comparación dando como resultado una baja incertidumbre en la calibración de sus medidas instrumentales. El segundo método de calibración dio como resultado valores de 0.864 ± 0.047 para $V-R$ y 0.252 ± 0.035 para $R-I$. A su vez, los valores de estos colores determinó su posición en el diagrama color-color. Este hecho nos permitió tener una idea aproximada de en que etapa de su vida fue observada.

Para la SN 2016cvk, también se calibró su brillo por dos métodos pues fue observada en tres distintos filtros. Al tener dos secuencias de observación para esta SN, se determinó el valor de los colores $V-R$ y $R-I$ para ambas secuencias. Para la primera secuencia se obtuvo que los valores eran $V-R = 0.073 \pm 0.005$ y $R-I = -0.010 \pm 0.007$, mientras que para la segunda secuencia se obtuvieron que eran $V-R = 0.017 \pm 0.005$ y $R-I = 0.015 \pm 0.007$. Asimismo, se obtuvo un promedio de estas dos secuencias cuyos valores fueron $V-R = 0.045 \pm 0.003$ y $R-I = 0.002 \pm 0.005$ encontrando que este valor promedio fue el que mejor se ubicó en el diagrama de diagnóstico. Sin embargo, se encontró una discrepancia notable cuando se ajustó el template de Nugent con los datos disponibles. Debido a esto la curva de luz ubicó nuestro valor en la fecha 12 previa a la explosión.

La calibración de la SN AT 2016eqb se logró realizar por ambos métodos debido a los pares

de imágenes disponibles en los filtros V y R . Por otro lado, se gráfico la curva de luz de esta SN para el filtro V usando los valores hallados de la SN, 15.806 mag para la 1ra secuencia y 15.847 mag para la segunda y los datos brindados por el grupo *ASASSN* junto al template de SN Ia de Nugent. De este gráfico, se pudo comprobar que los valores obtenidos para esta SN son acordes a lo encontrado en la literatura pero aun así presentaron gran dispersión respecto al *template*. Finalmente, al no tener datos del brillo de esta SN con un filtro I , solo se pudo trazar una recta que represente el color $V-R$ en el diagrama color-color. De este diagrama observamos como la intersección se encuentra entre la recta delimitada por los valores registrados entre los días 2 y -3. Esto nos indicó que el color $R-I$ se encontraría en un rango de entre -0.165 y -0.509, permitiéndonos inferir que el brillo que presentaba esta SN tenía un valor entre 16.028 mag y 16.372 mag en el filtro I .

Para la SN 2017erp se registró efectivamente su brillo por medio de dos métodos de corrección con una precisión del orden de 0.01 y 0.02 para el método m_1 y el método m_2 , respectivamente. Se construyó la curva de luz de la SN 2017erp para los filtros R y V , ubicando nuestros resultandos para confirmar el comportamiento de la SN en los días observados. A su vez, se analizó la tasa de declino de la curva de luz en el filtro B después de la explosión, encontrando un parámetro de $stretch = 0.953 \pm 0.005$ mediante el uso de una curva modelo de una SN Ia. Por otro lado, se realizó las correcciones con respecto: al máximo de brillo, al parámetro z y el parámetro de $stretch$, a la curva de luz en el filtro B convirtiéndola en una vela padrón. A partir de los valores determinados de s_{BV} y $\Delta m_{15}(B)$ se ubicó la SN en el gráfico s_{BV} vs. $\Delta m_{15}(B)$. Con esto se determinó que la SN 2017erp se comporta bien como una SN Ia típica y dentro del rango de normalidad.

En el caso de SN AT 2017erv, se obtuvo su magnitud calibrada usando sólo el primer método debido a que sólo fue observada con el filtro R . Asimismo, esto permitió obtener una mayor número de estrellas de comparación con respecto a las dos primeras SN tratadas, ganando mayor estabilidad en la calibración de sus medidas instrumentales. Se comparó también sus

magnitudes con el *template* de la curva de luz de una SN tipo Ia de Nugent en los filtros *V* y *R*. Como resultado se obtuvo una pequeña dispersión en la magnitud aparente en el segundo día con respecto al *template*.

Para la SN AT 2017eve el método de calibración usado fue similar al de la SN AT 2017erv debido a que fueron observadas el mismo día bajo las mismas condiciones. Por lo tanto, también se pudo obtener un mayor número de estrellas de comparación con gran consistencia en la calibración de sus medidas instrumentales. Sus magnitudes calibradas también fueron comparadas con el *template* de la curva de luz de una SN tipo Ia de Nugent en los filtros *V* y *R*. Finalmente, para esta SN se obtuvo que las magnitudes aparentes, de los tres días en que fue observada, siguen muy bien la tendencia del *template*.

En caso de la SN 2023gfo, se pudo calibrar sus magnitudes por los dos métodos lo que permitió calcular sus colores *V-R* y *R-I*. Para ambos métodos la magnitud en el filtro *R* resultó ser el mismo. Mientras que en el filtro *I* las magnitudes se encontraban dentro del rango de la incertidumbre de la otra. Sin embargo, fue en el filtro *V*, donde resultaron valores significativamente alejados. Por otro lado, el uso de los colores $V-R = 0.502 \pm 0.090$ y $R-I = 0.428 \pm 0.084$, ubicó a la SN en el periodo de tiempo de 34 a 42 post máximo de brillo cuando fue observada por el *OAUNI*. Este dato permitió ubicar nuestros valores en una curva de luz modelo para estudiar el comportamiento de nuestras observaciones. Finalmente, este gráfico nos permitió comprobar que el brillo de la SN seguía bien la tendencia de la curva de luz de la SN 2004et a pesar de experimentar una notoria dispersión en los datos conforme pasaron los meses.

Las magnitudes en el filtro *R* de SN 2023ijd se calibraron usando sólo el primer método. De igual manera al caso anterior se usó la curva de luz de la SN 2004et encontrando un comportamiento similar con nuestros datos y los encontrados por *ZTF*. Esta concordancia podría indicar que esta SN tipo II podría ser una SN IIp. Sin embargo, a falta de nuevos datos en este y otros filtros, no está clara la naturaleza de este evento.

Al igual que la SN anterior, las magnitudes de la SN 2023ixf en el filtro *R* fueron calibradas

unicamente mediante un método m_1 . En esta curva, nuestros datos siguieron muy bien la tendencia que presenta la SN 2023ixf a lo largo cuatro meses de datos. Además se pudo evaluar el cambio de pendiente que experimenta esta SN alrededor de los días 20 y 60, ya que pudo significar la formación de un *plateau*. No obstante, una publicación ([27]) puso en duda que se estaría tratando de una SN IIp ya que en este documento se la clasificó como una tipo II-L.

VI. Referencias bibliográficas

Referencias

- [1] O. GRESS, V. LIPUNOV, E. GORBOVSKOY, D. BUCKLEY, N. TIURINA, V. KORNILOV, A. KUZNETSOV, P. BALANUTSA, D. VLASENKO, I. GORBUNOV, E. POPOVA, V. VLADIMIROV, V. SHUMKOV, S. POTTER AND M. KOTZE , *MASTER: bright PSN in NGC5483*, The Astronomer's Telegram, No. 8415, December 2015.
- [2] R. J. FOLEY, R. HOUNSELL, J. A. MILLER, Y. C. PAN, A. REST, S. W. JHA, D. SCOLNIC, K. W. SMITH, D. WRIGHT, S. J. SMARTT, M. HUBER, K. C. CHAMBERS, H. FLEWELLING, M. WILLMAN, N. PRIMAK, A. SCHULTZ, B. GIBSON, E. MAGNIER, C. WATERS, J. TONRY AND R. J. WAINSCOT , *Spectroscopic Classifications of Optical Transients with SOAR*, The Astronomer's Telegram, No. 8434, December 2015.
- [3] R. LE BRETON, L. LE GUILLOU, M. FRASER, K. MAGUIRE, R. CARTIER, A. DE CIA, I. MANULIS, I. ARCAVI, C. INSERRA, E. KANKARE, S. J. SMARTT, K. W. SMITH, M. SULLIVAN, S. VALENTI, O. YARON, D. YOUNG, L. WYRZYKOWSKI, D. WRIGHT, K. CHAMBERS, H. FLEWELLING, M. HUBER, E. MAGNIER, J. TONRY, C. WATERS AND R. J. WAINSCOT , *PESSTO spectroscopic classification of optical transients*, The Astronomer's Telegram, No. 8437, December 2015.
- [4] A. PEREYRA, W. CORI, J. RICRA, M. ZEVALLOS AND J. TELLO , *Multiband photometry of PSNJ14102342-4318437 with OAUNI*, The Astronomer's Telegram, No. 8570, 2016.
- [5] S. PARKER , *BOSS Transient Discovery Report for 2016-06-13*, Transient Name Server Discovery Report, No. 2016-422, June 2016.
- [6] D. BERSIER, S. SMARTT AND O. YARON, *PESSTO Transient Classification Report for 2016-09-08*, Transient Name Server Classification Report, No. 2016-650, September 2016.

- [7] J. BRIMACOMBE, R. S. POST, S. KIYOTA, T. W. S. HOLOIEN, K. Z. STANEK, C. S. KOCHANNEK, J. S. BROWN, J. SHIELDS, D. GODOY-RIVERA, U. BASU, B. J. SHAPPEE, J. L. PRIETO, D. BERSIER, S. DONG, S. BOSE, P. CHEN, I. CRUZ AND G. STONE , *ASASSN-16hz: Discovery of A Probable Supernova in 2MASX J23154564-0120135*, The Astronomer's Telegram, No. 9332, August 2016.
- [8] Y. -C PAN, . C. D. KILPATRICK, M. R. SIEBERT, R. J. FOLEY, S. W. JHA, A. REST AND D. SCOLNIC, , *Spectroscopic Classifications of Optical Transients with Mayall/KOSMOS*, The Astronomer's Telegram, No. 9333, August 2016.
- [9] A. PEREYRA, J. RICRA AND M. ZEVALLOS , *OAUNI photometry of ASASSN-16hz*, The Astronomer's Telegram, No. 9835, December 2016.
- [10] K. ITAGAKI , *Transient Discovery Report for 2017-06-13*, Transient Name Server Discovery Report, No. 2017-647, June 2017.
- [11] S. W. JHA, Y. CAMACHO, K. DETTMAN, Y. C. PAN, R. J. FOLEY, A. REST, D. SCOLNIC AND R. SKELTON, , *SALT spectroscopic classification of SN 2017erp as a type-Ia supernova well before maximum light*, The Astronomer's Telegram 10490, June 2017.
- [12] G. THEUREAU, N. COUDREAU, N. HALLET, M. HANSKI, L. ALSAC, L. BOTTINELLI, L. GOUGUENHEIM, J. M. MARTIN AND G. PATUREL , *Kinematics of the local universe . XII. 21-cm line measurements of 586 galaxies with the new Nançay receiver*, Astronomy and Astrophysics, Volumen 430, p.373-383 January 2005.
- [13] J. BURKE , *Optical Photometric Inhomogeneities in a Sample of Ten Early Type Ia Supernovae*, American Astronomical Society meeting No. 235, id. 412.01. Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 52, No. 1, January 2020.
- [14] P.J. BROWN, G. HOSSEINZADEH, S. W. JHA, D. SAND, E. VIEIRA, X. WANG, M. DAI, K. G. DETTMAN, J. MOULD, S. UDDIN, L. WANG, I. ARCAVI, J. BENTO, C. R. BURNS, T.

- DIAMOND, D. HIRAMATSU, D. A. HOWELL, E. Y. HSIAO, G. H. MARION, C. MCCULLY, P. A. MILNE, D. MIRZAQULOV, A. J. RUITER, S. VALENTI AND D. XIANG, *Red and Reddened: Ultraviolet through Near-infrared Observations of Type Ia Supernova 2017erp*, The Astrophysical Journal, Volume 877, Issue 2, article id. 152, 13 pp. , June 2019.
- [15] M. M. PHILLIPS, P. LIRA, N. B. SUNTZEFF, R. A. SCHOMMER, M. HAMUY AND J. MAZA, *The Reddening-Free Decline Rate Versus Luminosity Relationship for Type IA Supernovae*, The Astronomical Journal, Volume 118, Issue 4, pp. 1766, october 1999.
- [16] B. NICHOLLS, J. BRIMACOMBE, P. CACELLA, J. S. BROWN, K. Z. STANEK, T. W. S. HOLOIEN, C. S. KOCHANEK, J. SHIELDS, T. A. THOMPSON, B. J. SHAPPEE, J. L. PRIETO, D. BERSIER, S. DONG, S. BOSE, P. CHEN AND J. M. FERNANDEZ, *ASASSN-17ho and ASASSN-17hq: Discovery of Two Probable Supernovae*, The Astronomer's Telegram, No. 10509, June 2017.
- [17] S. UDDIN, J. MOULD, J. ZHANG, B. TUCKER, L. WANG AND X. WANG , *Spectroscopic classification of nine optical transients from ASASSN, ATLAS, Gaia, and Pan-STARRS1*, The Astronomer's Telegram, No. 10517, June 2017.
- [18] T. MOORE, K. W. SMITH, S. SRIVASTAV, D. R. YOUNG, M. NICHOLL, M. FULTON, M. MCCOLLUM, J. WESTON, S. J. SMARTT, L. SHINGLES, L. RHODES, L. DENNEAU, J. TONRY, H. WEILAND, A. LAWRENCE, R. SIVERD, N. ERASMUS, W. KOORTS, A. JORDAN, V. SUC, A. REST, T. W. CHEN, C. STUBBS AND J. SOMMER, *ATLAS23ioa (AT2023gfo): discovery of a candidate SN in NGC 4995 (26 Mpc)*, Transient Name Server AstroNote 2023-92, April 2023.
- [19] M. FULTON, S. SRIVASTAV, M. NICHOLL, K. W. SMITH, D. R. YOUNG, T. MOORE, J. WESTON, S. A. SIM, S. J. SMARTT AND L. SHINGLES, *QUB Transient Classification Report for 2023-04-21*, Transient Name Server Classification Report, No. 2023-871, April 2023.

- [20] K. Z. STANEK , *ASAS-SN Transient Discovery Report for 2023-05-14*, Transient Name Server Discovery Report, No. 2023-1092, May 2023.
- [21] D. PERLEY , *Transient Classification Report for 2023-05-15*, Transient Name Server Classification Report, No. 2023-1112, May 2023.
- [22] K. ITAGAKI , *Transient Discovery Report for 2023-05-19*, Transient Name Server Discovery Report, No. 2023-1158, May 2023.
- [23] D. PERLEY AND A. GAL-YAM , *Transient Classification Report for 2023-05-19*, Transient Name Server Classification Report, No. 2023-1164, May 2023.
- [24] M. D. FULTON, M. NICHOLL, K. W. SMITH, S. SRIVASTAV, D. R. YOUNG, M. MCCOLLUM, T. MOORE, S. SIM, J. WESTON, X. SHENG, L. SHINGLES, J. SOMMER, A. AAMER, S. J. SMARTT, H. STEVANCE, L. RHODES, A. ANDERSSON, L. DENNEAU, J. TONRY, H. WEILAND, A. LAWRENCE, R. SIVERD, N. ERASMUS, W. KOORTS, J. ANDERSON, A. JORDAN, V. SUC, A. REST, T. W. CHEN AND C. STUBBS , *ATLAS forced photometry pre-discovery limit of SN 2023ixf*, Transient Name Server AstroNote 2023-124, May 2023.
- [25] A. V. FILIPPENKO, W. ZHENG AND Y. YANG , *Filippenko Prediscovery Image of SN 2023ixf*, Transient Name Server AstroNote 2023-123, May 2023.
- [26] J. BASU, S. BARWAY, G. C. ANUPAMA, R. S. TEJA AND A. DUTTA , *Search for the progenitor of SN 2023ixf in archival AstroSat UVIT images*, The Astronomer's Telegram, No. 16064, May 2023.
- [27] G. BIANCIARDI, A. M. CICCARELLI, G. CONZO, M. D'ANGELO, S. GHIA, M. MORICONI, Z. ORBANIĆ, N. RUOCCO, I. SHARP, M. UHLÁR AND F. WALTER , *Multiband Photometry Evolution in the First Weeks of SN 2023ixf, a possible II-L Subtype Supernova* , Transient Name Server AstroNote 2023-213, July 2023.

- [28] W. BAADE AND F. ZWICKY , *ON SUPER-NOVAE* , Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 20, Issue 5, pp. 254-259, May 1934.
- [29] M. V. PRUZHINSKAYA AND S. M. LISAKOV, *HOW SUPERNOVAE BECAME THE BASIS OF OBSERVATIONAL COSMOLOGY*, Journal of Astronomical History and Heritage, 19(2), 203–215 (2016).
- [30] A. W. ALSABTI AND P. MURDIN , *Handbook of supernova*, Springer International Publishing AG, 2017.
- [31] B. CARROLL AND D. OSTLIE , *An Introduction to Modern Astrophysics*, Cambridge University Press, second edition, 2017.
- [32] M. M. PHILLIPS , *The absolute magnitudes of type Ia supernovae*, The Astrophysical Journal Letters v.413, p.L105, August 1993.
- [33] S. BLONDIN, T. M. DAVIS, K. KRISCIUNAS, B. P. SCHMIDT, J. SOLLERMAN, W. M. WOODVASEY, A. C. BECKER, P. CHALLIS, A. CLOCCHIATTI, G. DAMKE, A. V. FILIPPENKO, R. J. FOLEY, P. M. GARNAVICH, S. W. JHA, R. P. KIRSHNER, B. LEIBUNDGUT, W. LI, T. MATHE-SON, G. MIKNAITIS AND G. NARAYAN , *Time Dilation in Type Ia Supernova Spectra at High Redshift*, The Astrophysical Journal, Volume 682 Issue 2 pp. 724-736, August 2008.
- [34] S. BLONDIN AND J. L. TONRY , *Determining the Type, Redshift, and Age of a Supernova Spectrum*, The Astrophysical Journal, Volume 666, Issue 2, pp. 1024-1047, September 2007.
- [35] M. KIEWE, A. GAL-YAM, I. ARCAVI, D. C. LEONARD, J. E. ENRIQUEZ, S. B. GENKO, D. B. FOX, D. MOON, D. J. SAND AND A. M. SODERBERG , *Caltech Core-Collapse Project (CCCP) Observations of Type II In Supernovae: Typical Properties and Implications for Their Progenitor Stars*, The Astrophysical Journal, Volume 744, Issue 1, article id. 10, 19 pp., January 2012.

- [36] M. HAMUY AND N. B. SUNTZEFF , *SN 1987A in the LMC. III. UBVRI Photometry at Cerro Tololo*, *Astronomical Journal* v.99, p.1146, April 1990.
- [37] R. COELHO, M. CALVAO, R. REIS AND B. B. SIFFERT. , *Standardization of type Ia supernovae*, *European Journal of Physics* Volume 36, november 2014.
- [38] C. R. BURNS, M. STRITZINGER, M. M. PHILLIPS, E. Y. HSIAO, C. CONTRERAS, S. E. PERSSON, G. FOLATELLI, L. BOLDT, A. CAMPILLAY, S. CASTELLÓN, W. L. FREEDMAN, B. F. MADORE, N. MORRELL, F. SALGADO AND N. B. SUNTZEFF , *The Carnegie Supernova Project: Intrinsic Colors of Type Ia Supernovae*, *The Astrophysical Journal*, Volume 789, Issue 1, article id. 32, 20 pp., July 2014.
- [39] K. KRISCIUNAS, C. CONTRERAS, C. R. BURNS, M. M. PHILLIPS, M. D. STRITZINGER, N. MORRELL, M. HAMUY, J. ANAIS, L. BOLDT, L. BUSTA, A. CAMPILLAY, S. CASTELLÓN, G. FOLATELLI, W. L. FREEDMAN, C. GONZÁLEZ, E. Y. HSIAO, W. KRZEMINSKI, ; S. E. PERSSON, M. ROTH AND F. SALGADO , *The Carnegie Supernova Project. I. Third Photometry Data Release of Low-redshift Type Ia Supernovae and Other White Dwarf Explosions*, *The Astronomical Journal*, Volume 154, Issue 5, id.211, November 2017.
- [40] D. POZNANSKI, A. GAL-YAM, D. MAOZ, A. FILIPPENKO, D. LEONARD AND T. MATHESON , *Not Color Blind: Using Multiband Photometry to Classify Supernovae*, *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 114, Issue 798, pp. 833-845, August 2002.
- [41] J. PANKAJ , *An Introduction to astronomy and astrophysics*, Published by CRC Press, 2014.
- [42] B. WARNER , *A Practical Guide to Lightcurve Photometry Analysis*, Cambridge University Press, second edition, 2006.
- [43] M. FERNÁNDEZ , *Curvas de luz de estrellas variables*, Universidad Complutense de Madrid, trabajo académicamente dirigido, septiembre 2002.

- [44] A. PEREYRA, J. TELLO, E. MEZA, W. CORI, J. RICRA AND M. I. ZEVALLOS , *UNI Astronomical Observatory - OAUNI: First light*, Revista de la Facultad de Ciencias de la UNI, REVCUNI 18(1), 4–9., December 2015.
- [45] N. ZACHARIAS, C. T. FINCH, T. M. GIRARD, A. HENDEN, J. L. BARTLETT, D. G. MONET, M. I. & ZACHARIAS, *The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4)*, The Astronomical Journal, Volumen 145, 2013.
- [46] D. TODY , *The IRAF Data Reduction and Analysis System*, N: Instrumentation in astronomy VI; Proceedings of the Meeting, Tucson, AZ, Mar. 4-8, 1986. Part 2 (A87-36376 15-35). Bellingham, WA, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, p. 733., January 1986.
- [47] V. L. AFANASIEV, E. S. SHABLOVINSKAYA, R. I. UKLEIN AND E. A. MALYGIN , *Stokes-polarimeter for 1-meter telescope*, Astrophysical Bulletin, 2021, Vol 76, Issue 1, p102, January 2021.
- [48] J. S. BROWN, J. L. PRIETO, B. J. SHAPPEE, S. DONG, N. MORRELL, K. Z. STANEK, T. W. -S. HOLOIEN, C. S. KOCHANEK, J. SHIELDS, D. BERSIER, S. BOSE, P. CHEN, J. BRIMACOMBE AND P. MARPLES, *ASASSN-16jt and pre-outburst transient AT 2016cvk resemble the unusual transient SN 2009jp*, The Astronomer's Telegram, No. 9445, September 2016.
- [49] P. NUGENT, A. KIM AND S. PERLMUTTER, , *K-Corrections and Extinction Corrections for Type Ia Supernovae*, The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 114, Issue 798, pp. 803-819, August 2002.
- [50] J. BRIMACOMBE, J. S. BROWN, K. Z. STANEK, T. W. -S. HOLOIEN, C. S. KOCHANEK, J. SHIELDS, B. J. SHAPPEE, J. L. PRIETO, D. BERSIER, S. DONG, S. BOSE, P. CHEN, G. KRANNICH, G. MASI, B. NICHOLLS, J. NICOLAS, R. S. POST & G. STONE, *ASASSN-16jt: Discovery of A Probable Supernova in ESO 344-G 021*, The Astronomer's Telegram, No. 9439, 2016.

- [51] D. K. SAHU, G. C. ANUPAMA, S. SRIVIDYA & S. MUNEER, *Photometric and spectroscopic evolution of the Type IIP supernova SN 2004et*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 372, Issue 3, November 2006, Pages 1315-1324, 2006.
- [52] E. C. BELLM, SH. R. KULKARNI, M. J. GRAHAM, R. DEKANY, R. M. SMITH, R. RIDDLE, F. J. MASCI, G. HELOU, T. A. PRINCE & S. M. ADAMS, The Astronomical Society of the Pacific. 131 018002, 2019.