

ACTIVIDAD #5: COSMÓLOGOS POR UN DÍA. DETERMINANDO EL VALOR DE H_0 USANDO SUPERNOVAS TIPO IA

FECHA DE ENTREGA: 27 DE NOVIEMBRE DE 2025

Las supernovas (SN) son explosiones energéticas de estrellas en las últimas etapas de su vida. Se clasifican en dos tipos generales: las de colapso de núcleo (producidas por estrellas de alta masa) y las de colapso termonuclear o Tipo Ia.

Observaciones detalladas de SN han sido cruciales para el descubrimiento de la expansión acelerada del universo, la comprensión de la formación de elementos pesados y la estimación de distancias a galaxias lejanas. El hecho de por qué las supernovas Tipo Ia pueden ser usadas como candelas estándar para medir distancias se debe a que, al ser producidas por el mismo mecanismo de explosión termonuclear al alcanzar la Masa de Chandrasekhar ($1.4M_\odot$), poseen una luminosidad intrínseca muy similar. Este brillo aparente se mide a través de curvas de luz, que muestran la variación del brillo en función del tiempo.

Al obtener el punto máximo de brillo en la curva de luz de una supernova Tipo Ia y el redshift de su galaxia anfitriona, es posible calcular la distancia a la supernova y, a partir de una muestra significativa, estimar la constante de Hubble (H_0) usando la relación distancia-luminosidad.

El volumen de datos generado por surveys como el Zwicky Transient Facility (ZTF) y el futuro Vera C. Rubin Observatory (LSST) hace indispensable el uso de técnicas de Machine Learning para la clasificación. Para esto fue creado ALeRCE (Automatic Learning for the Rapid Classification of Events, ?), un broker astronómico chileno.

1. Objetivos

- Familiarizarse con la herramienta Explorer de ALeRCE para analizar curvas de luz de supernovas obtenidas por el ZTF.
- Identificar curvas de luz de supernovas tipo Ia.
- Extraer el máximo de brillo aparente (m) de las curvas de luz y el *redshift* de la galaxia anfitriona.
- Realizar el cálculo de la constante de Hubble H_0 usando la relación de distancia-luminosidad usando la regresión lineal entre la distancia y el *redshift*.
- Discutir las fuentes de error en la estimación de H_0 .

Figura 1: Selección de clasificador, clase y número mínimo de detecciones en ALeRCE Explorer.

2. Procedimiento

Primero comience ingresando al Explorer de ALeRCE a través del siguiente enlace: <https://alerce.online/>. En la opción de selección de *Classifier*, seleccione **Lc Classifier (?)** y en la opción de *Class* seleccione **SNia**. Para tener un buen muestreo de la curva de luz, puede establecer el número mínimo de detecciones en 25. Finalmente, como el clasificador funciona a partir de una selección de probabilidades, asegúrese de ordenar los resultados por la columna **Highest Probability** en orden descendente (de mayor a menor probabilidad). Todo lo anterior como se observa en la figura ??.

De este grupo de resultados obtenidos anteriormente, seleccione una muestra de al menos 10 supernovas tipo Ia y complete la siguiente tabla ?? con el **Object ID**, el número de detecciones y la probabilidad más alta que le asignó el clasificador a cada una de ellas.:

Tabla 1: Supernovas tipo Ia seleccionadas y sus principales parámetros.

Nº	ID Objeto	Nº Detecciones	Probabilidad Máxima
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Seleccionada cualquiera de las anteriores supernovas analizaremos sus curvas de luz. La curva de luz obtenida se muestra en la figura ?? . Las curvas de luz obtenidas por el telescopio ZTF están en

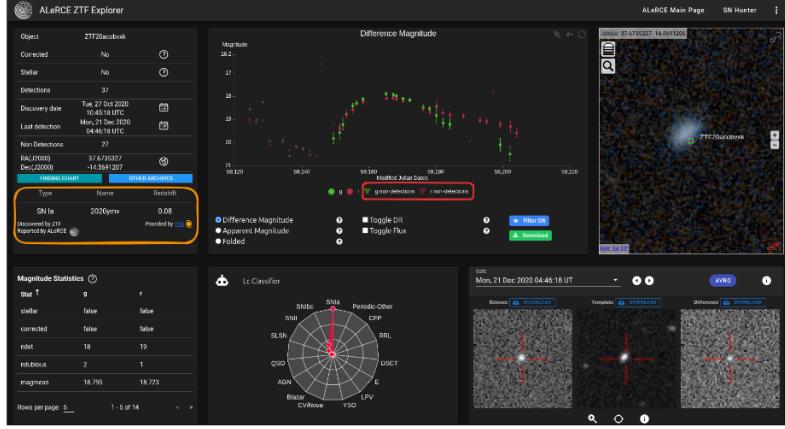


Figura 2: Selección de un resultado de la búsqueda.

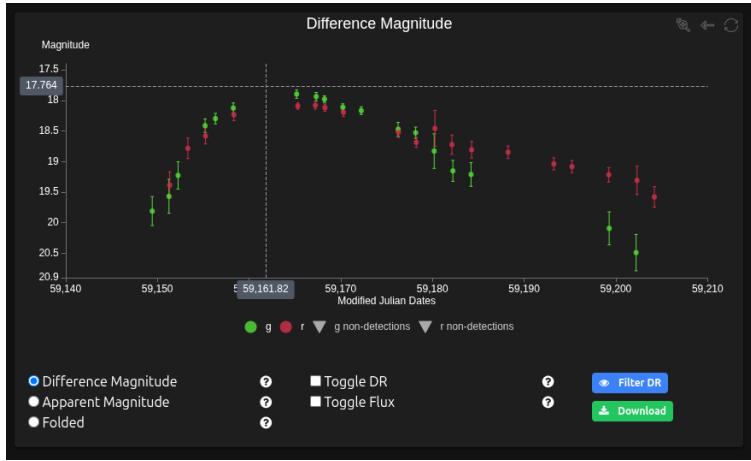


Figura 3: Identificación del punto máximo de brillo aparente en la curva de luz.

dos filtros: g (puntos verdes) y r (puntos rojos). Para esta actividad no nos interesa la fotometría forzada, por lo que podemos desactivar las fechas que se encuentran encerradas en el recuadro rojo de la imagen. Adicionalmente, el *ALeRCE Explorer* nos entrega información adicional sobre la supernova y su galaxia anfitriona, como el *redshift* (z), su clasificación espectral y el nombre asignado por el IAU (International Astronomical Union), encerrado en el recuadro naranja de la imagen.

Procedemos ahora a trabajar con la curva de luz. Intenta identificar el punto máximo de brillo aparente ($m_{g,\max}$ y $m_{r,\max}$) en la curva de luz, tanto en el filtro g como en el r . El *ALeRCE Explorer* permite realizar esta medición de forma interactiva al posicionar el cursor sobre el punto máximo de la curva, como se puede ver en la figura ??.

Completa ahora la tabla ?? con los valores de $m_{g,\max}$ y $m_{r,\max}$ obtenidos en ambos filtros para cada una de las supernovas seleccionadas, el *Modified Julian Day* asociado a cada uno de los máximos, el valor de *redshift* (z) de la galaxia anfitriona¹, y el nombre asignado por el IAU, teniendo en

¹En caso de no encontrar reportado en el *ALeRCE Explorer* el *redshift* consulte en internet e indique la referencia de donde obtuvo el dato.

cuenta el *ID Object* de cada supernova, como se muestra en la tabla ??.

Tabla 2: Datos de las curvas de luz de la muestra de objetos.

Número	ID Objeto	Nombre IAU	Máximo m_g	MJD (g)	Máximo m_r	MJD (r)	Redshift (z)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Debemos ahora calcular la distancia a cada una de las supernovas seleccionadas. Para esto, usaremos la relación entre el brillo aparente (m), el brillo absoluto (M) y la distancia (d) dada por la ecuación:

$$m - M = 5 \log_{10}(d) - 5 \quad (1)$$

donde puede asumir, como primera aproximación, que para las supernovas tipo Ia, el brillo absoluto en la banda B es $\langle M_B \rangle \approx M_B = -19.3 \pm 0.3$ (?) y a partir de las siguientes relaciones $M_g \approx M_B - 0.15$ y $M_r \approx M_B - 0.25$ puede hallar la magnitud absoluta en las bandas g y r respectivamente. En cualquiera de los dos filtros (g o r), use la ecuación ?? para calcular la distancia a cada supernova en megapársecs (Mpc). Complete la tabla ?? con los valores de distancia obtenidos en ambos filtros con su respectivo error.

Ahora para calcular la constante de Hubble (H_0), usaremos la relación lineal entre la distancia (d) y el *redshift* (z) dada por la ecuación²:

$$d = \frac{c}{H_0} \cdot z \quad (2)$$

donde c es la velocidad de la luz en km/s.

Para hallar el valor de H_0 , realice una regresión lineal entre los valores de distancia (d) y *redshift* (z) obtenidos para las supernovas seleccionadas, usando la ecuación ???. Para esto puede usar cualquier herramienta o lenguaje de programación con el que se sienta cómodo. Recuerde que la pendiente de la recta obtenida en la regresión lineal será igual a $\frac{c}{H_0}$, por lo que podrá despejar H_0 . Realice este procedimiento para ambos filtros, g y r y compare los resultados obtenidos.

Finalmente queremos comparar nuestro gráfico obtenido con la obtenida por ?. Para esto debemos convertir el valor de *redshift* (z) a velocidad (v) usando la relación:

$$v = c \cdot z \quad (3)$$

²Esta ecuación es solo válida cuando $z \ll 1$.

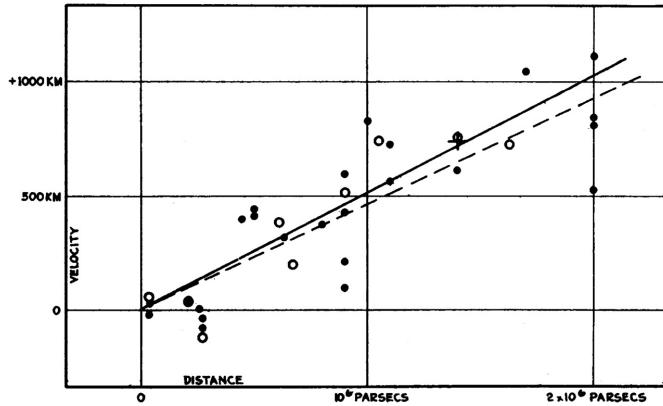


Figura 4: Gráfico original de Hubble (1929) mostrando la relación entre la velocidad de las galaxias y su distancia. Fuente: <https://www.loc.gov/item/2002721874/>.

donde c es la velocidad de la luz en km/s. Realice esta conversión para cada supernova seleccionada y grafique la velocidad (v) en función de la distancia (d) obtenida anteriormente. Ajuste una línea recta a los datos y compare su gráfico con el gráfico original de Hubble el cual es:

La idea final es comparar nuestros resultados con el valor aceptado de la constante de Hubble, $H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (?). Discuta las posibles fuentes de error en nuestra estimación de H_0 , considerando tanto errores sistemáticos como aleatorios.

3. A entregar para su evaluación

Presente la tabla ?? con todas las columnas completas, la tabla ?? con todas las columnas completas, incluyendo los valores de distancia calculados en ambos filtros, las imágenes de las curvas de luz de las supernovas seleccionadas y todos los gráficos obtenidos para realizar el análisis [3 pts].

- Describa la morfología general de las curvas de luz de las supernovas tipo Ia y explique cómo se relaciona con el proceso físico que ocurre durante la explosión de la supernova [1pts].
- Reporte el valor de la constante de Hubble H_0 obtenido en ambos filtros, y compare con el valor aceptado. Discuta las posibles razones de las diferencias encontradas [2pts].
- Explique los posibles errores en la estimación de la constante de Hubble H_0 y discuta cómo estos errores podrían afectar el valor obtenido [0.5pts]

4. Referencias

Referencias

Förster, F., Cabrera-Vives, G., Castillo-Navarrete, E., Estévez, P. A., Sánchez-Sáez, P., et al. (2021). The Automatic Learning for the Rapid Classification of Events (ALeRCE) Alert Broker. , 161(5):242.

Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3):168–173.

Riess, A. G., Yuan, W., Macri, L. M., Scolnic, D., Brout, D., Casertano, S., Jones, D. O., Murakami, Y., Anand, G. S., Breuval, L., Brink, T. G., Filippenko, A. V., Hoffmann, S., Jha, S. W., D'arcy Kenworthy, W., Mackenty, J., Stahl, B. E., and Zheng, W. (2022). A comprehensive measurement of the local value of the hubble constant with 1 km s⁻¹ mpc⁻¹ uncertainty from the hubble space telescope and the sh0es team. *The Astrophysical Journal Letters*, 934(1):L7.

Sánchez-Sáez, P., Reyes, I., Valenzuela, C., Förster, F., Eyheramendy, S., Elorrieta, F., Bauer, F. E., Cabrera-Vives, G., Estévez, P. A., Catelan, M., Pignata, G., Huijse, P., De Cicco, D., Arévalo, P., Carrasco-Davis, R., Abril, J., Kurtev, R., Borissova, J., Arredondo, J., Castillo-Navarrete, E., Rodriguez, D., Ruz-Mieres, D., Moya, A., Sabatini-Gacitúa, L., Sepúlveda-Cobo, C., and Camacho-Iñiguez, E. (2021). Alert Classification for the ALeRCE Broker System: The Light Curve Classifier. , 161(3):141.