

# Abundancia Química del Cúmulo Globular Omega Centauri ( $\omega$ Cen) a Partir de GALAH

Mariluz Graterol Ruiz  
Núcleo Universitario “Rafael Rangel”  
Universidad de Los Andes

## Resumen

Los cúmulos globulares son importantes en el campo de la astrofísica debido a que son objetos antiguos de la Vía Láctea. Para este estudio se seleccionó específicamente Omega Centauri, porque es uno de los más densos, por tanto, se dificulta hallar la composición química de todo el cúmulo. En tal sentido, el objetivo principal busca determinar la abundancia química del cúmulo globular Omega Centauri ( $\omega$  Cen) a partir de GALAH. Para obtener los miembros del cúmulo, se aplicó el método de corrección fotométrica al catálogo GAIA EDR3, y aunado a los movimientos propios se extrajo una muestra de 229,525 estrellas las cuales fueron cruzadas con los datos del catálogo GALAH y se obtuvieron espectros para 127 estrellas de 25 elementos químicos. Como resultado, al calcular las abundancias promedios, se encontró una metalicidad de  $[Fe/H] \sim -1,46$  y abundancias químicas a escala solar, superiores e inferiores a la solar. También se encontraron estrellas con gravedades superficiales y temperaturas iguales, pero con diferentes abundancias. Como conclusión, la distribución espacial de las estrellas varía según el elemento químico y su abundancia. Es posible que la diversidad química se deba a procesos de autoenriquecimiento o la agregación de grupos más pequeños con diferentes abundancias químicas.

**Palabras clave:** abundancia química, cúmulo, temperatura, gravedad superficial, GALAH.

## Chemical Abundance of the Omega Centauri Globular Cluster ( $\omega$ Cen) from GALAH

### Abstract

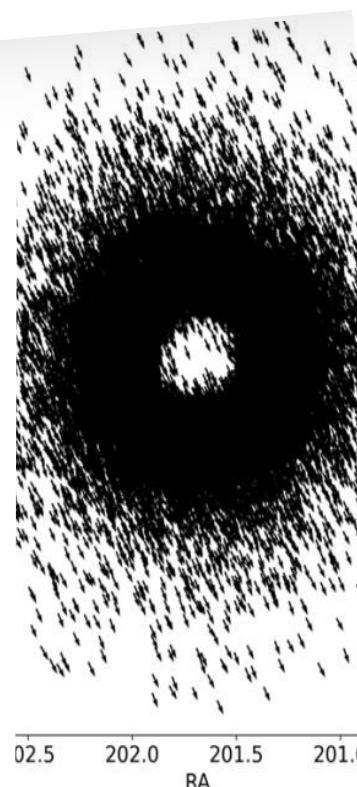
Globular clusters are significant in the field of astrophysics as they represent ancient objects within the Milky Way. Specifically, for this study, Omega Centauri was chosen due to its exceptional density, which makes determining the chemical composition of the entire cluster challenging. Consequently, the main objective is to determine the chemical abundance of the Omega Centauri globular cluster ( $\omega$  Cen) using GALAH. To identify the cluster members, the photometric correction method was applied to the GAIA EDR3 catalog. In addition to this, by considering proper motions, a sample of 229,525 stars was extracted. These stars were then cross-referenced with GALAH

#### Citación sugerida:

Graterol Ruiz, M. 2024. Abundancia Química del Cúmulo Globular Omega Centauri ( $\omega$  Cen) a partir de GALAH. Revista De Ciencias, 27(1). <https://doi.org/10.25100/rc.v27i1.12970>.

Recibido: 21-05-23  
Aceptado: 04-10-23

ORCID  
0000-0001-6588-0975



catalog data, resulting in obtaining spectra for 127 stars, covering 25 chemical elements. As a result, upon calculating average abundances, a metallicity of  $[Fe/H] \sim -1.46$  was found, along with chemical abundances both above and below the solar scale. Notably, stars with similar surface gravities and temperatures exhibited varying abundances. In conclusion, the spatial distribution of stars varies with respect to the chemical element and its abundance. The observed chemical diversity might stem from self-enrichment processes or the aggregation of smaller groups with different chemical abundances.

**Keywords:** chemical abundance, cluster, temperature, surface gravity, GALAH.

## 1. Introducción

Los cúmulos globulares son los objetos más antiguos de la Vía Láctea, por tanto, proporcionan un registro evolutivo, estructural y químico que permite entender la configuración actual del universo. Las regiones exteriores de los cúmulos globulares (GC) son de particular interés, ya que el conocimiento de las propiedades químicas de las estrellas en estas regiones más alejadas es esencial para comprender las poblaciones múltiples <sup>(1)</sup>. Ahora, es bien sabido que la mayoría de los cúmulos globulares (GC) tienen dos grupos principales de estrellas: la primera población estelar (1G) con una composición química similar a las estrellas del halo, y la segunda población (2G) de estrellas enriquecidas en helio, nitrógeno y sodio, y empobrecidas en carbono y oxígeno <sup>(2)</sup>. En virtud de las múltiples poblaciones estelares encontradas en los GC, este estudio tiene como objetivo determinar la abundancia química del cúmulo globular Omega Centauri ( $\omega$  cen) a partir de GALAH.

Se seleccionó específicamente Omega Centauri ( $\omega$  Cen) debido a su complejidad química y aunque ha sido objeto de diversos estudios, sigue siendo un cúmulo globular importante en astrofísica por sus características físicas y químicas. Este se encuentra ubicado a unos 17.000 años luz de la Tierra en la constelación de Centaurus <sup>(3)</sup>. Además, es uno de los más masivos y densos de la Vía Láctea, ya que alberga alrededor de 10 millones de estrellas con un diámetro aproximado de 450 años luz <sup>(4)</sup>, lo que hace complejo determinar la abundancia química de todo el cúmulo en un solo estudio.

Químicamente la abundancia en Omega Centauri muestra variaciones en la metalicidad y en las proporciones de diferentes elementos presentes en sus estrellas. Algunos estudios <sup>(5)</sup> confirman la existencia de gigantes rojas ricas en metales y mejoradas con He en  $\omega$  Cen. Otros autores <sup>(6)</sup>, por lo contrario, afirman singularidad de estrella, no sólo por sus sobreabundancias de Li y Na sino también por su peculiar combinación de altas abundancias de C y N aunado a esto,  $\omega$  Cen muestra signos claros de formación estelar extendida y auto enriquecimiento inducido por múltiples episodios de formación estela <sup>(7)</sup>, en consecuencia, estudiar su abundancia química permitiría esclarecer la evolución de uno de los cúmulos más densos de la Vía Láctea.

Ahora bien, como la densidad del cúmulo y el número de estrellas que lo componen dificultan la selección de los miembros para un análisis químico, se utilizó el método <sup>(8,9)</sup> basado en la corrección fotométrica al catálogo publicado por GAIA EDR3, este método consiste en obtener mediciones de brillo más precisas y para lograrlo, se aplican algoritmos que consideran factores como el color de la estrella, su posición en el cielo, y otras fuentes de error conocidas. Estos ajustes son necesarios porque permiten obtener magnitudes fotométricas confiables, lo cual es crucial para realizar estudios científicos y análisis detallados de las estrellas. Seguidamente, con los movimientos propios fueron definidos los miembros del cúmulo que permitieron seleccionar los espectros desde el catálogo GALAH y determinar la abundancia química de  $\omega$  Cen. Los movimientos propios se refieren al desplazamiento aparente de una estrella a lo largo del tiempo en relación con otras estrellas de fondo. Este método permite encontrar estrellas con movimientos propios similares, y si estos son consistentes, se considera que las estrellas son miembros

probables del cúmulo. Esto significa que en este estudio se parte desde cero, ya que no se utilizan muestras seleccionadas por otros investigadores. Aquí se definen los miembros del cúmulo, lo que permitirá seleccionar los espectros para determinar la abundancia química.

## Los datos.

Para efectos del estudio, se seleccionaron 22180 estrellas como muestra de una población de 229525 pertenecientes al catálogo de GAIA EDR3. La tercera publicación de GAIA proporciona una gran cantidad de nuevos productos. La primera parte del lanzamiento, GAIA EDR3, ya aportó datos astrométricos y fotométricos para casi dos mil millones de fuentes. El lanzamiento completo ahora agrega parámetros mejorados en comparación con GAIA DR2. Las mejoras están en términos de la cantidad de fuentes y la variedad de información de parámetros con precisión <sup>(10)</sup>. Por otro lado, se seleccionaron 127 estrellas del catálogo GALAH, el cual proporciona medidas de abundancia de elementos químicos para estrellas, junto con distancias de precisión y propiedades orbitales de alta dimensión enfocados en estudiar la evolución de la Vía Láctea <sup>(11)</sup>. Los elementos químicos seleccionados para calcular la abundancia química del cúmulo globular constan de los siguientes: C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Mo, Ru, Ba, La, Nd, Sm y Eu.

## 2. Materiales y métodos

El método utilizado se basa en un proceso previo <sup>(12)</sup> que consiste en calcular las abundancias promedio del cúmulo globular Omega Centauri ( $\omega$  Cen). Sin embargo, para llevar a cabo este procedimiento, fue necesario ejecutar un conjunto de etapas, entre las que se encuentran las siguientes. En primer lugar, se implementó un método establecido para realizar la corrección fotométrica del catálogo de GAIA EDR3 <sup>(8,9)</sup> y así seleccionar los miembros del cúmulo mediante sus movimientos propios. En segundo lugar, se descargaron las abundancias químicas del cúmulo globular del catálogo GALAH, para luego hacer prueba cruzada entre los miembros del cúmulo seleccionados en el catálogo de GAIA EDR3 y la muestra obtenida en GALAH. Finalmente, como tercera etapa, se determinaron las abundancias químicas del cúmulo ( $\omega$  Cen).

### Corrección fotométrica del catálogo de GAIA y selección de los miembros del cúmulo globular $\omega$ Cen a través de los movimientos propios.

Como el archivo de GAIA EDR3 proporciona los BP y RP no corregidos con exceso de flujo a través de la columna `phot_bp_rp_excess_factor` <sup>(8)</sup>. Aquí, el usuario puede calcular el factor C de exceso pertenecientes a BP y RP corregido (`phot_bp_rp_excess_factor_corr`). Sin embargo, dado que esta es una relación simple entre el flujo total en BP y RP, y el flujo de banda G ( $C = (I_{BP} + I_{RP}) = I_G$ ), existe una fuerte dependencia del color. Por tanto, el uso de este exceso de flujo de BP y RP a menudo puede conducir a resultados que son difíciles de interpretar. Para superar esta limitación, el factor de exceso de flujo corregido (C) se expresa de la siguiente manera:  $C^* = C \cdot f(I_{BP} + I_{RP})$  y se usan los polinomios provistos  $f(x) = \sum a_i x^i$ .

Se recuerda al usuario que C no está disponible como una columna en el archivo GAIA EDR3 y, por lo tanto, debe calcularse. C proporciona una medida de consistencia entre la fotometría de banda G, BP y RP y, por lo tanto, puede usarse para excluir fuentes que muestren inconsistencias. Para diseñar un criterio de selección para C <sup>(8)</sup>, se implementaron estándares ya establecidos <sup>(13,14)</sup> con el fin de determinar la dispersión de C versus la magnitud de G usando todas las fuentes en la muestra con  $G > 9$  (para evitar problemas con estadísticas de números bajos en el extremo brillante). La dispersión se midió en intervalos de 0,01 mag y el conjunto de datos resultante se ajustó luego con una ley de potencia simple en magnitud G <sup>(8)</sup>:

$\sigma^*G = C_0 + C_1 G^m$  con  $C_0 = 0:0059898$ ,  $C_1 = 8:817481 \cdot 10^{(-12)}$  y  $m = 7:618399$ . Se considera que este ajuste representa la dispersión  $1\sigma$  para una muestra de fuentes estelares aisladas de buen comportamiento con GAIA de buena calidad fotométrica. Por otro lado, la condición “bp\_rp > -20” asegura que ninguna corrección se intenta en caso de que el color (GBP – GRP) no esté disponible (“bp\_rp is not null” no funciona) <sup>(9)</sup>.

Siguiendo estos criterios la primera parte del filtrado queda así:

```
SELECT gaia.*,
IF_THEN_ELSE (
  bp_rp > -20,
  phot_bp_rp_excess_factor (1.162004 + 0.011464* bp_rp
+ 0.049255* power(bp_rp ,2)
- 0.005879* power(bp_rp ,3)),
  bp_rp < 0.5,
  phot_bp_rp_excess_factor (1.154360 + 0.033772* bp_rp
+ 0.032277* power(bp_rp ,2)),
  bp_rp >= 4.0,
  phot_bp_rp_excess_factor -(1.057572 + 0.140537* bp_rp)
)),
phot_bp_rp_excess_factor
) AS phot_bp_rp_excess_factor_corr,
0.0059898+8.817481e-12*power(phot_g_mean_mag,7.618399)
AS phot_bp_rp_excess_factor_sigma,
```

### **Sistemática por uso de color por defecto en la determinación de parámetros de imagen (IPD).**

Al determinar los flujos de la banda G, un PSF o LSF (función de dispersión de puntos o función de extensión de línea, respectivamente, por sus siglas en inglés) necesario para poder realizar el IPD (determinación de parámetros de imagen IPD por sus siglas en inglés) <sup>(15)</sup>. Uno de los parámetros utilizados para seleccionar el LSF/PSF, es el color de la fuente y para esto se utiliza el valor  $V_{\text{eff}}$  determinado del espectro medio de BP y RP. En los que, este valor no estuvo disponible, se implementó uno predeterminado, lo que conducirá a un efecto sistemático tanto en la astrometría como en la fotometría de banda G.

Desafortunadamente, la importancia de este efecto no se reconoció lo suficientemente temprano como para incluirlo en la calibración fotométrica modelo. En consecuencia, la única opción para GAIA EDR3 fue derivar una corrección a la fotometría de fuente media calibrada internamente. Además, se derivaron solo datos para los cuales el IPD usó el apropiado  $V_{\text{eff}}$  como resultado, la fotometría no se ve afectada por este problema <sup>(8)</sup>. La investigación en función de la magnitud mostró que la sistemática dependía principalmente de la configuración de la magnitud, por lo que el análisis se dividió en los rangos de magnitud  $G < 13$ ,  $13 < G < 16$  y  $G > 16$ . Existe una leve dependencia adicional de la magnitud en las magnitudes más débiles, por consiguiente, no se necesita una corrección significativa para el rango más brillante que corresponde a fuentes observadas principalmente con observaciones 2D.

Esto probablemente se deba a que la calibración de color del PSF no es tan buena como la LSF <sup>(15)</sup>. Por ello, la diferencia entre el procesamiento electrónico normal y predeterminado no es tan pronunciada. Para lograr la corrección se implementó una relación cúbica simple como una función de color  $C^*=C^*_f$  (GBR – GRP) que se ajustó a la sistemática medida y los coeficientes se dan en la tabla 1 para las dos magnitudes rangos que se requiere la corrección.

Consecuentemente, el flujo  $G$  corregido se puede obtener como  $I^*G=IG \times f(GBR - GRP)$  la aplicabilidad rango en  $(GBR - GRP)$  de estas correcciones es de 0,25 a 3,0. Fuera de este rango, los valores de corrección en estos límites deben usarse.

Es importante señalar, que no se necesita corrección para  $G < 13$ . Para validar esta corrección, se seleccionaron estrellas de secuencia principal <sup>(8)</sup>.

**Tabla 1.** Coeficientes de la corrección a los flujos de banda  $G$

$G$ rango	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
$13 < G < 16$	1.00876	-0.02540	0.01747	-0.00277
$G > 16$ .	1.00525	-0.02323	0.01740	-0.00253

**Fuente:** tabla elaborada con datos tomados de Photometric content and validation <sup>(8)</sup>.

Aquí los flujos antiguos se multiplican por esta corrección para obtener los flujos corregidos.

En virtud de esto, el código para el filtrado en GAIA queda de la siguiente manera:

```
IF_THEN_ELSE (
  bp_rp > -20,
  TO_REAL( CASE_CONDITION (
    phot_g_mean_mag - 2.5* log10( (1.00525 -0.02323* greatest (0.25 , least(bp_rp , 3)) +
0.01740* power(greatest (0.25 ,
  least(bp_rp , 3)) ,2) -0.00253* power(greatest (0.25 , least(bp_rp , 3)) ,3)) ),
  astrometric_params_solved = 31, phot_g_mean_mag ,
  phot_g_mean_mag < 13, phot_g_mean_mag ,
  phot_g_mean_mag < 16, phot_g_mean_mag - 2.5* log10( (1.00876 -0.02540* greatest
(0.25 , least(bp_rp , 3))
+0.01747* power(greatest (0.25 , least(bp_rp , 3)) ,2) -0.00277* power(greatest (0.25 ,
least(bp_rp , 3)) ,3)) )
  )),
```

### Corrección de saturación.

El impacto de la saturación en los resultados de la fotometría de banda  $G$  ha disminuido con respecto a GAIA DR2 no obstante, Las magnitudes corregidas de las magnitudes medias en GAIA EDR3,  $G_{xp}^{corr}$  se puede obtener con las siguientes ecuaciones <sup>(8)</sup>:

$$G^{corr} - G = -0.09892 + 0.059G - 0.009775G^2 + 0.0004934G^3 \quad (C1)$$

$$G_{BP}^{corr} - G_{BP} = -0.9921 - 0.02598G + 0.1833G^2 - 0.02862G^3 \quad (C2)$$

$$G_{RP}^{corr} - G_{RP} = -14.94 + 14.41G_{RP} - 4.657G_{RP}^2 + 0.503G_{RP}^3 \quad (C3)$$

2:0 <  $G$  < 8 para Eq. C.1

2:0 <  $G$  < 3.94 para Eq. C.2

2:0 <  $G_{RP}$  < 3.45 para Eq. C.3

**Con esta corrección el filtro queda de esta manera.**

```
phot_g_mean_flux
) AS phot_g_mean_flux_corr,
IF_THEN_ELSE(
  phot_g_mean_mag < 8,
  to_real(phot_g_mean_mag - 0.09892 + 0.059*phot_g_mean_mag -
0.009775*power(phot_g_mean_mag,2)+0.0004934*power(phot_g_mean_mag,3)),
  phot_g_mean_mag
) AS phot_g_mean_mag_unsat,
IF_THEN_ELSE(
  phot_g_mean_mag < 3.94,
  to_real(phot_bp_mean_mag - 0.9921 - 0.02598*phot_g_mean_mag +
0.1833*power(phot_g_mean_mag,2)-0.02862*power(phot_g_mean_mag,3)),
  phot_bp_mean_mag
) AS phot_bp_mean_mag_unsat,
IF_THEN_ELSE(
  phot_rp_mean_mag < 3.45,
  to_real(phot_rp_mean_mag - 14.94 + 14.41*phot_rp_mean_mag -
4.657*power(phot_rp_mean_mag,2)+0.503*power(phot_rp_mean_mag,3)),
  phot_rp_mean_mag
) AS phot_rp_mean_mag_unsat,
```

### **Transformaciones fotométricas.**

Esta sección proporciona transformaciones de color que relacionan los sistemas fotométricos GAIA EDR3 con otros sistemas como Hipparcos, Tycho-2, SDSS12, Johnson-Cousins y 2MASS. Para todos los ajustes, excepto Johnson-Cousins, solo se utilizaron aquellas fuentes con un error de pequeña magnitud y un pequeño exceso de flujo de BP y RP. En el caso de Johnson-Cousins, se utilizaron todas las fuentes disponibles debido a la alta calidad de estos estándares. <sup>(8)</sup> Las fuentes GAIA EDR3 con  $G < 13$  mag, la fotometría en las tres bandas de paso de GAIA y en los sistemas fotométricos externos se compararon con estos catálogos externos. El límite de magnitud se utilizó para restringir la influencia del ruido fotométrico en las relaciones derivadas entre GAIA EDR3 y los otros sistemas. Sin embargo, este rango de magnitud no es apropiado para las transformaciones SDSS12 ya que las fuentes SDSS12 más brillantes que 14 mag están saturadas. Así, para las transformaciones SDSS12 se utilizaron fuentes GAIA EDR3 con magnitudes  $G < 0.01$  <sup>(8)</sup>:

```
bp_rp > -20,
TO_REAL( CASE_CONDITION (
  TO_REAL(-999.999),
  bp_rp < 0.3, TO_REAL(-999.999),
  bp_rp < 3.0, TO_REAL(phot_g_mean_mag-0.2199+0.6365*bp_rp+0.1548*power(bp_
rp,2)-0.0064*power(bp_rp,3))
)), TO_REAL(-999.999)
) AS g_predicted_from_bp_rp,
IF_THEN_ELSE (
  bp_rp > -20,
  TO_REAL( CASE_CONDITION (
    TO_REAL(-999.999),
    bp_rp < 0.0, TO_REAL(-999.999),
    bp_rp < 3.0, TO_REAL(phot_g_mean_mag+0.09837-0.08592*bp_rp-0.1907*power(bp_
rp,2)+0.1701*power(bp_rp,3)-0.02263*power(bp_rp,4))
```

```

   )), TO_REAL(-999.999)
) AS r_predicted_from_bp_rp,
IF_THEN_ELSE (
    bp_rp > -20,
    TO_REAL( CASE_CONDITION (
        TO_REAL(-999.999),
        bp_rp < 0.5, TO_REAL(-999.999),
        bp_rp < 2.0, TO_REAL(phot_g_mean_mag+0.293-0.6404*bp_rp+0.09609*power(bp_
rp,2)+0.002104*power(bp_rp,3))
    )), TO_REAL(-999.999)
) AS i_predicted_from_bp_rp,
IF_THEN_ELSE (
    bp_rp > -20,
    TO_REAL( CASE_CONDITION (
        TO_REAL(-999.999),
        bp_rp < -0.5, TO_REAL(-999.999),
        bp_rp < 5.0, TO_REAL(phot_g_mean_mag-0.01448+0.06874*bp_rp+0.3604*pow-
er(bp_rp,2)-0.06718*power(bp_rp,3)+0.006061*power(bp_rp,4))
    )), TO_REAL(-999.999)
) AS B_predicted_from_bp_rp,
IF_THEN_ELSE (
    bp_rp > -20,
    TO_REAL( CASE_CONDITION (
        TO_REAL(-999.999),
        bp_rp < -0.5, TO_REAL(-999.999),
        bp_rp < 5.0, TO_REAL(phot_g_mean_mag+0.02704-0.01424*bp_rp+0.2156*pow-
er(bp_rp,2)-0.01426*power(bp_rp,3))
    )), TO_REAL(-999.999)

```

phot\_Xp\_n\_blended\_transits & phot\_Xp\_n\_contaminated\_transits:

Estas predicciones se utilizan para evaluar si un tránsito determinado se vio afectado por la cercanía entre los píxeles en función de esto, se pueden encontrar dos casos: los tránsitos pueden estar contaminados por una fuente cercana (que puede haber tenido o no una ventana asignada en ese escaneo satelital en una región específica del cielo). Es decir, puede darse el caso de que exista otra fuente presente en la misma ventana de observación o muy cerca. También pueden estar mezclados, lo cual se da cuando alguna fuente adicional es capturada por la misma ventana. Por último, se define las coordenadas del objeto <sup>(9)</sup>.

```

) AS V_predicted_from_bp_rp,
(phot_bp_n_blended_transits+phot_rp_n_blended_transits)/(phot_bp_n_obs+phot_
rp_n_obs) as betablend,
(phot_bp_n_contaminated_transits+phot_rp_n_contaminated_transits)/(phot_bp_n_
obs+phot_rp_n_obs) as betacontam
FROM gaiaedr3.gaia_source as gaia
WHERE
CONTAINS(
    POINT('ICRS',gaia.ra,gaia.dec),
    CIRCLE('ICRS',201.697,-47.47947,1)
)=1

```

### Correcciones adicionales.

Una vez descargada la muestra, fue necesario realizar un conjunto de correcciones adicionales esto se hizo en topcat o en python <sup>(8)</sup> como es el caso de la fotometría de banda G corregida para estrellas que han tenido un  $V_{eff}$  predeterminado utilizado en el IPD. En su

mayoría, se pueden identificar en el archivo GAIA EDR3 como aquellos que tienen `astrometric_params_solved=95`. También está el caso de `astrometric_params_solved=31` para el cual el valor de  $V_{eff}$  utilizado no se puede establecer desde el archivo.

Además, se seleccionaron las `betablend` y `betacontam` menores al 10%, e `ipd_frac_multi_peak`: cuyo campo proporciona información sobre las ventanas de observación utilizadas para el procesamiento astrométrico de esta fuente. Proporciona la fracción de ventanas para las que el algoritmo IPD ha identificado un pico doble, lo que significa que la detección puede ser una estrella doble <sup>(9)</sup>. Con respecto al `ipd_frac_odd_win` este se refiere al porcentaje de tránsitos con cortes o alteraciones generadas al capturar las fuentes.

Un porcentaje alto indica que una fuente está perturbada debido a fuentes cercanas en un campo aglomerado o debido a una fuente cercana brillante ( $G < 13$ ) <sup>(9)</sup>. La categoría de procesamiento fotométrico de cada fuente se indica en el catálogo publicado mediante un campo numérico (`phot_proc_mode`), asumiendo valores 0, 1 y 2 para fuentes de oro, plata y bronce, en donde las fuentes de oro tienen la mejor calibración fotométrica. Finalmente, se hace corrección astrométrica para eliminar las paralajes negativas ( $\varpi/\sigma_{\varpi} > 0$ ). A continuación, al igual que en los cúmulos estelares, las estrellas miembros de Omega Centauri se formaron en conjunto a partir de la misma nube molecular. Debido a esto, al presentar las estrellas movimientos propios similares, se consideran como posibles miembros del cúmulo. En función de esta característica distintiva, se seleccionaron las estrellas miembros (Figura 1).

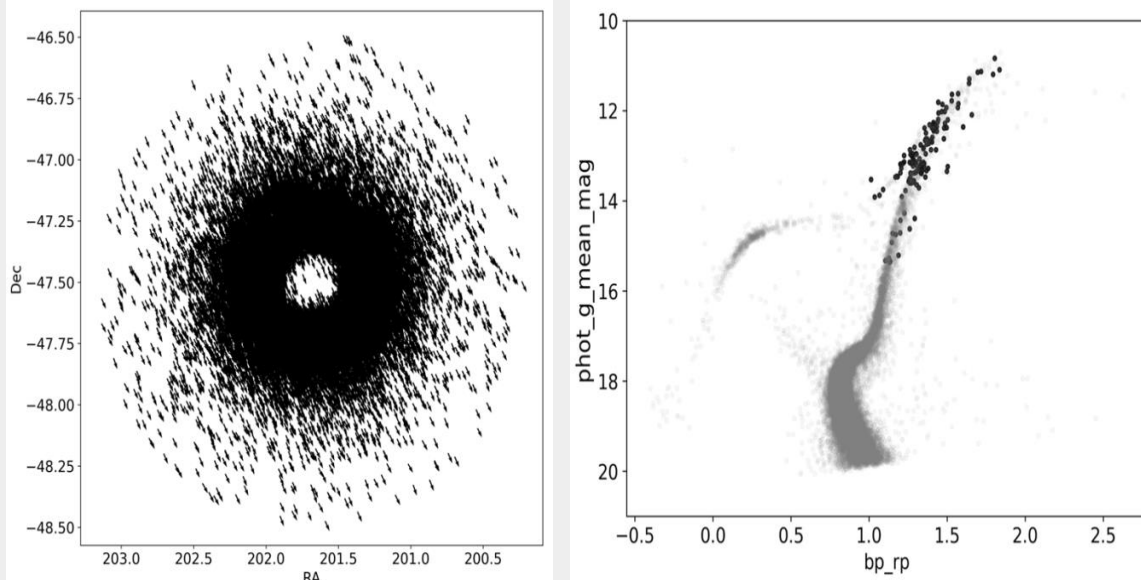
### **Selección de espectros del cúmulo globular en el catálogo de GALAH.**

El catálogo GALAH proporciona el mayor número de abundancias de elementos obtenidas a partir de espectros de alta resolución ( $R \sim 28\,000$ ) publicados hasta la fecha para una muestra de estrellas. Esto promete información dinámica y de edad más precisa que cualquier otro catálogo hasta ahora <sup>(9)</sup>. Con el tercer lanzamiento de datos del sondeo HERMES (GALAH), se han publicado 678423 espectros correspondientes a 588571 estrellas, la mayoría de las cuales están cercanas (el 81,2 % de las estrellas se encuentra dentro de  $< 2$  kpc). Estos espectros fueron obtenidos con el espectrógrafo HERMES del Telescopio Anglo-Australiano. Cuya nueva versión, conocida como GALAH+ DR3, incluye todas las observaciones de GALAH Fase uno y un subconjunto de observaciones auxiliares que incluyen más de 75 cúmulos estelares. Para obtener esta muestra, se ejecutó el siguiente código:

```
SELECT
galah_main.*, gaia_vac.ra,gaia_vac.dec
FROM galah_dr3p2.main_star as galah_main
INNER JOIN galah_dr3p2.vac_gaia_edr3
as gaia_vac on galah_main.dr3_source_id = gaia_vac.dr3_source_id
WHERE 1=CONTAINS(POINT('ICRS', gaia_vac.ra, gaia_vac.dec),
CIRCLE('ICRS',  $\alpha$ ,  $\delta$ , 2.0))
```

Seguidamente, se realizó una prueba cruzada entre los miembros del cúmulo globular y las abundancias químicas obteniendo como resultado 127 estrellas. Ahora bien, utilizando `topcat` se realizó la limpieza del catálogo que GALAH propone a través de la ejecución de las siguientes condiciones: en general, se plantean tres recomendaciones: (1) `snr_c3_iraf > 30`; (2) solo parámetros estelares para estrellas con `flag_sp == 0`, `flag_fe_h == 0`; (3) solo abundancias elementales con `flag_X_fe == 0`, así se obtuvo los miembros del cúmulo y la selección de la muestra en GALAH. (Figura 1).





**Figura 1.** Cúmulo globular Omega Centauri.

En el lado izquierda se observa los movimientos propios de la muestra donde los vectores tienen el mismo sentido significa que son miembros del cúmulo. Mientras que en el derecho está el diagrama color magnitud de  $\omega$  Cen producto de la corrección fotométrica y movimientos propios, a partir de los cuales fue extraída la muestra desde el catálogo de GALAH. Crédito datos de la misión GAIA de la Agencia Espacial Europea (ESA) y Encuesta GALAH basada en datos adquiridos a través del Observatorio Astronómico Australiano <sup>(16,17)</sup>.

### 3. Resultados y discusión

El método propuesto para determinar la composición química de los cúmulos globulares implica calcular las abundancias promedio de los elementos químicos en python <sup>(12)</sup>. Para ello, se aplican las restricciones indicadas por GALAH (`flag_X_h == 0`) a los valores de la muestra obtenida tras la limpieza del catálogo. Los elementos seleccionados incluyen: C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Mo, Ru, Ba, La, Nd, Sm, Eu.

En primer lugar, se determinó la metalicidad del cúmulo, que resultó en  $[Fe/H] \sim -1,46$ . Luego, se graficó la abundancia promedio  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  de los 25 elementos en la (Figura 2). Sin embargo, es importante destacar que el carbono no se encontró en la muestra seleccionada, por lo que se graficó el siguiente elemento, en este caso el oxígeno (O), cuyos resultados arrojaron que la mayoría de las estrellas se distribuyen hacia valores superiores con una metalicidad por encima de la solar  $[O/Fe] > 0$ . Se ha encontrado que las estrellas ricas en oxígeno exhiben una distribución espacial diferente a las pobres <sup>(7)</sup>. Por otro lado, en el sodio (Na) a diferencia del oxígeno, se encontraron más estrellas en la muestra y la mediana fue mayor a la solar (Tabla 2). Por esta razón, hay estrellas concentradas en el centro (Figura 2).

En cuanto al magnesio (Mg), su distribución fue central y se encontraron estrellas tanto por encima como por debajo de la solar  $[Mg/Fe] < 0$ . El aluminio, por su parte, tiene una distribución espacial extendida y la mayoría superó la metalicidad solar  $[Al/Fe] > 0$ , lo que indica que son ricas en aluminio. Continuando con las abundancias el silicio tuvo una distribución espacial centrada en la (Figura 2) y la mayoría de las estrellas son ricas en metales. En el potasio las estrellas están agrupadas en el rango  $-0,5 \geq [K/Fe] \leq +0,5$ .

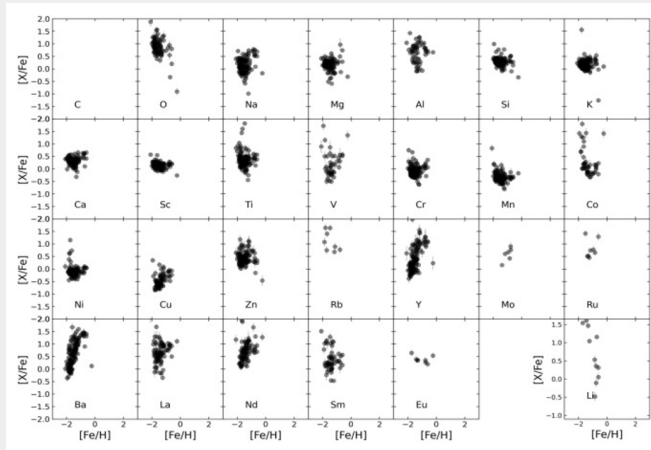
Para el calcio (Ca) las estrellas que se encuentran en su mayoría concentradas entre  $0,0 \geq [\text{Ca}/\text{Fe}] \leq +0,5$  por otro lado el escandio (Sc) tiene una distribución espacial con concentración en la metalicidad a escala solar, además el escandio se usa típicamente como un marcador de la producción de elementos de pico de Fe en poblaciones estelares, y las estrellas del halo galáctico y del cúmulo globular tienden a exhibir abundancias de  $[\text{Sc}/\text{Fe}]$  a escala solar <sup>(7)</sup>. Con respecto al titanio presenta una distribución dispersa, aunque la mayoría de estrellas están concentradas a escala solar.

El vanadio (V) muestra una distribución en la (Figura 2) dispersa con estrellas bajo y por encima de la metalicidad solar, aunque la mediana es casi solar (Tabla 2), existen estrellas ricas y pobres en este elemento. El siguiente elemento es cromo (Cr) cuyas estrellas se encuentran entre  $-0,5 \geq [\text{Cr}/\text{Fe}] \leq +0,5$ . Mientras que el manganeso (Mn) a diferencia de los anteriores elementos se puede observar que la mayoría de las estrellas están por debajo de la escala solar, es decir, que son pobres en manganeso. Por otro lado, el cobalto (Co) presenta una distribución particular al tener estrellas pobres y ricas en cobalto.

El níquel (Ni) tiene una distribución en la (Figura 2) con estrellas por debajo de la metalicidad solar y la mayoría de estrellas se encuentran concentradas en entre  $-0,5 \geq [\text{Cr}/\text{Fe}] \leq 0,0$  (Figura 2). El cobre (Cu) con una mediana menor que la escala solar (Tabla 2), presenta dispersión hacia las estrellas pobres. El cinc (Zn) exceptuando a dos estrellas la mayoría está por encima de la escala solar. El rubidio (Rb) tiene una distribución con escala mayor a la solar  $[\text{Rb}/\text{Fe}] > 0,5$ . El elemento ytrio (Y) muestra estrellas distribuidas espacialmente de forma dispersa encontrándose la mayoría por encima de la escala solar. En el molibdeno (Mo) todas las estrellas superan la escala solar. Por otro lado, el rutenio (Ru) tiene una distribución  $[\text{Ru}/\text{Fe}] > 0,5$ .

Bario (Ba) es un elemento cuya dispersión en la (Figura 2) está a escala superior a la solar donde la mayoría son ricas en bario. Entre otros elementos está el lantano (La) de igual manera tiene estrellas dispersas hacia escalas superiores a la metalicidad solar. En el neodimio (Nd) todas las estrellas superan a la metalicidad solar. Samario (Sm) muestran variaciones de estrella a estrella y están dispersas entre el rango  $-0,5 \geq [\text{Sm}/\text{Fe}] \leq 1,5$  (Figura 2). Europio (Eu) tiene estrellas que superan la escala solar. Por último, está el litio (Li) con una dispersión localizada entre  $-0,5 \geq [\text{Li}/\text{Fe}] \leq 2,0$ .

Como se puede observar, hay estrellas cuya abundancia están por debajo de la escala solar, en la solar y mayor que la solar, tal variación es posible según estudios realizados a que Omega centauri experimentó una evolución química y aunque los resultados obtenidos no son concluyentes <sup>(18)</sup> identifica dos casos que pueden explicar la evolución de Omega centauri: El primer caso es el autoenriquecimiento del cúmulo con las estrellas más ricas en metales que se forman a partir de gas contaminado por desechos de generaciones anteriores de estrellas; el segundo caso hace referencia a que el grupo se formó por la agregación de grupos más pequeños con diferentes historias y composiciones. Por supuesto, la verdadera historia bien podría ser una mezcla del primero y segundo, o una evolución no prevista por ninguno de los dos. Aunque la imagen más simple de la evolución química en este cúmulo es que procedió a través del autoenriquecimiento dentro de una sola nube.



**Figura 2.** Abundancias químicas en función del hierro [Fe/H].

Se muestra la abundancia promedio de los elementos químicos con respecto al hierro en el cúmulo globular Omega Centauri en el gráfico algunas estrellas están concentradas a escala solar mientras otras son pobres y ricas en metales.

**Tabla 2.** Abundancias promedio obtenidas en el cúmulo globular  $\omega$  Cen.

Abundancias promedio	Número de estrellas	Abundancias promedio	Número de estrellas
[O/Fe] = +0,87	83	[Ni/Fe] = -0,12	102
[Na/Fe] = +0,09	125	[Cu/Fe] = -0,484	74
[Mg/Fe] = +0,15	117	[Zn/Fe] = 0,345	116
[Al/Fe] = +0,71	59	[Rb/Fe] = 0,98	8
[Si/Fe] = +0,28	120	[Y/Fe] = 0,31	119
[K/Fe] = +0,15	125	[Mo/Fe] = 0,637	6
[Ca/Fe] = +0,31	117	[Ru/Fe] = 0,697	8
[Sc/Fe] = 0,13	124	[Ba/Fe] = 0,64	128
[Ti/Fe] = 0,29	115	[La/Fe] = 0,634	87
[V/Fe] = 0,065	42	[Nd/Fe] = 0,68	92
[Cr/Fe] = -0,08	109	[Sm/Fe] = 0,26	56
[Mn/Fe] = -0,354	120	[Li/Fe] = 1,042	13
[Co/Fe] = -0,08	47		

Elaboración de Tabla 2, con base a las abundancias químicas publicados por el catálogo de GALAH

### Abundancia química en función de la gravedad superficial.

Se muestra a partir de GALAH la sensibilidad de las abundancias ante la gravedad superficial, tal como lo demuestra la evolución estelar las estrellas de la secuencia principal tiene gravedades bajas mientras que las más evolucionadas como las gigantes, gravedades altas, ahora bien, mientras las estrellas de la secuencia principal están en escala solar las gigantes ascienden hacia la derecha en el gráfico, como se puede observar las estrellas de todas las abundancias se encuentran concentradas en su mayoría en la escala de la gravedad superficial entre  $1 \geq \log(g) \leq 3$  (Figura 3).

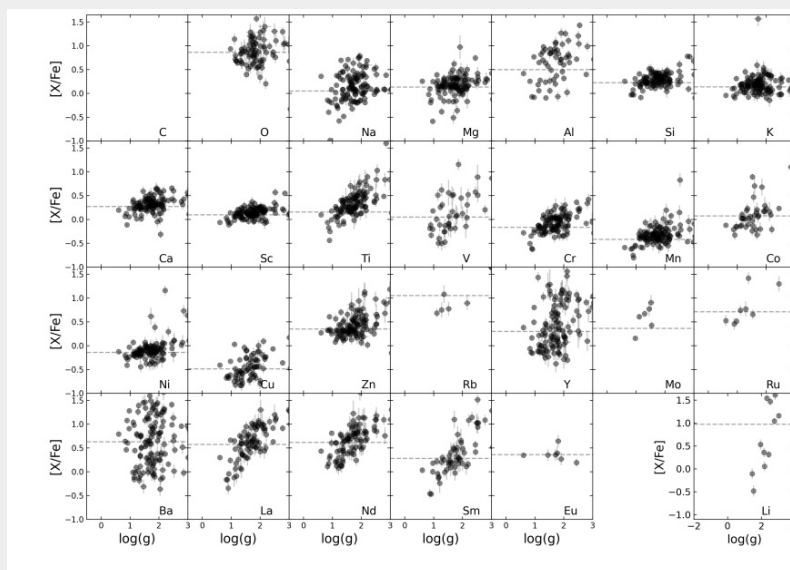
Con respecto a la evolución de las estrellas, la abundancia en el oxígeno exhibe abundancias superior a la escala solar entre  $0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,5$ , mientras que en el siguiente elemento hay estrellas pobres y ricas en Na entre  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +0,5$ . Referente al Mg la mayor cantidad de estrellas están en la escala solar mientras que una minoría se distribuye en escala inferior

y superior a la solar, con el Al aumenta con la gravedad y las estrellas se dispersan ascendiendo hacia la derecha (Figura 3). Con el Si, K, Ca y Sc tiene concentrada las estrellas entre  $0,0 \geq [X/Fe] \leq +0,5$ . Por otro lado, el Ti contiene pobres y ricas en metales distribuidas entre  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,0$  contrariamente la abundancia en el V presenta pocas estrellas dispersas menor a la escala solar y superior a esta en el rango  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,0$ . Referente al Cr tiene estrellas menor y mayor a la escala solar cuya distribución está en  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +0,5$  (Figura 3).

Con el Mn la concentración de las abundancias están bajo la escala solar entre  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq 0,0$  el Co aunque la mayoría está en escala solar hay estrellas pobres y ricas en metales distribuidas entre  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +0,5$  con el Ni las estrellas se concentran en  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq 0,0$ , es decir hay muestras pobres en metales, mientras en el Cu las estrellas en su mayoría son pobres en metales agrupándose en la escala entre  $-1,0 \geq [X/Fe] \leq 0,0$ . Con respecto al Zn esta muestra es rica en metales con escala superior a la solar en su mayoría concentrándose entre  $0,0 \geq [X/Fe] \leq 1,0$ . El Rb tiene solo cuatro estrellas localizadas en el rango de  $0,5 \geq [X/Fe] \leq 1,0$ . Por otro, lado el Y exhibe estrellas dispersas con escalas menor y mayor que la solar distribuidas entre el rango  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,5$ .

En el elemento Mo hay pocas estrellas distribuidas en escala mayor a la solar localizada en la (Figura 3) entre  $0,0 \geq [X/Fe] \leq 1,0$  mientras que en el siguiente elemento son ricas en Ru ya que todas las estrellas están por encima de la escala solar dispersas entre  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,5$  en el Ba hay muestras que son pobres y ricas en metales algunas están agrupadas a escala solar y otras ascienden de forma dispersa en la (Figura 3). En el La aunque la mayoría de las muestras se encuentran agrupadas a escala solar también hay estrellas pobres y ricas en metales todos distribuidos entre  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,5$ . En Nd las estrellas están por encima de la escala solar, por otro lado en Sm se encuentra la muestra dispersa  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,5$  aunque la mayoría se concentra entre  $0,0 \geq [X/Fe] \leq +0,5$  en el siguiente elemento las estrellas son ricas en Eu y por último el Li tiene estrellas pobres y ricas en metales entre  $-0,5 \geq [X/Fe] \leq +1,5$ .

En este estudio se ha encontrado que la abundancia química en el cúmulo varía significativamente en función de la gravedad superficial. Por ejemplo, una estrella con una gravedad superficial alta puede tener una tasa de fusión de elementos más alta en su núcleo y puede producir más elementos pesados. Del mismo modo, una estrella con una gravedad superficial baja puede tener una tasa de fusión más baja y producir menos elementos pesados. Sin embargo, hay estrellas en el cúmulo que, aunque tienen la misma gravedad superficial difieren en la abundancia química, es posible que esto se deba a la presencia de varias poblaciones que difieren en helio, metalicidad, abundancia de elementos ligeros, aunque también es posible que esto pueda deberse simplemente a una mala mezcla en regiones de formación estelar <sup>(19)</sup>.



**Figura 3.** Abundancia química en función de la gravedad superficial  $\log(g)$ .

Se observa la sensibilidad de la abundancia química ante la gravedad superficial.

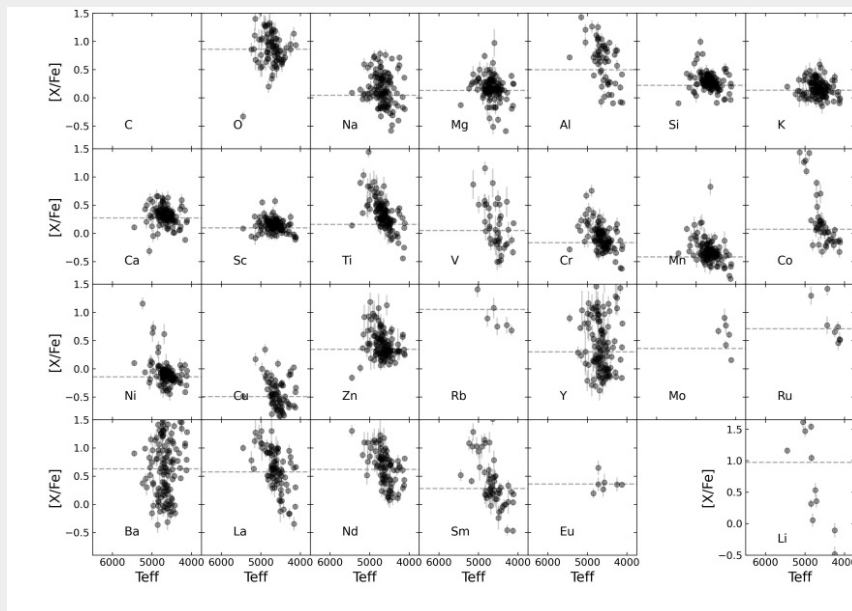
### **Abundancias en función de la temperatura ( $t_{\text{eff}}$ ).**

La temperatura de la muestra seleccionada está entre 4000 y 5000 K° en este caso se observa que en el oxígeno exceptuando una estrella son ricas en metales, es decir, superan a la escala solar, con respecto al sodio, magnesio, aluminio, vanadio, ytrio, bario, lantano, cobalto, samario, titanio y litio, hay abundancias menor a la solar como superior a la solar distribuyéndose las estrellas de forma dispersa en el gráfico. La abundancia en el silicio, potasio, calcio, y cinc, aumenta con la temperatura y la mayoría de las estrellas tienen escalas superiores a la solar. En el escandio la mayoría de la muestra está concentrada entre  $0,5 \geq [X/Fe] \leq -0,5$ . Por otro lado el cromo, manganeso, níquel, cobre tienen la mayor concentración de estrellas con abundancias menores a la escala solar, mientras que el rubidio, molibdeno, rutenio y europio presentan menor número de estrellas con abundancias ricas en metalicidad (Figura 4).

La temperatura es uno de los factores que determinan qué elementos se pueden formar en el núcleo de una estrella y qué elementos se pueden fusionar juntos. A medida que una estrella evoluciona, su temperatura central aumenta y la presión también aumenta, lo que permite que los elementos más pesados se fusionen en el núcleo. Si la temperatura es demasiado baja, solo los elementos más ligeros se pueden fusionar. Esto significa que las estrellas más frías en Omega Centauri pueden tener una abundancia química más baja de elementos pesados que las estrellas más calientes.

Sin embargo, aunque la abundancia química puede variar con la temperatura debido a varios procesos físicos y químicos que ocurren dentro de las estrellas, la relación entre la temperatura y la abundancia química puede ser compleja en un cúmulo como Omega Centauri. Por tanto, además de los procesos mencionados, la abundancia química también puede verse afectada por otros factores, como la masa, la edad y la evolución estelar. En tal sentido, la relación precisa entre la temperatura y abundancia química en Omega Centauri depende de otros factores.

En síntesis, la muestra seleccionada con el método utilizado permitió determinar las abundancias químicas del cúmulo, no obstante, cabe señalar que el método ejecutado tiene limitaciones porque solo se pudo determinar la abundancia química de una muestra conformada por 22180 estrellas pertenecientes al catálogo de GAIA EDR3, a partir de la cual se extrajeron 127 estrellas desde el catálogo GALAH. Ahora, considerando que el cúmulo tiene aproximadamente 10 millones de estrellas, es una muestra inferior la estudiada. Sin embargo, a pesar de esta limitación se pudo extraer una muestra desde GAIA EDR3 del cúmulo, que permitió determinar la particular abundancia química tanto de elementos pesados como ligeros.



**Figura 4.** Abundancias en función de la temperatura (teff) .

En el gráfico se encuentra elementos con abundancias químicas en la escala solar pero, también, hay elementos con iguales temperaturas cuyas estrellas son ricas y pobres en metalicidad.

## 4. Conclusiones

En este estudio se realizó la corrección fotométrica del catálogo de GAIA <sup>(8)</sup> lo que permitió seleccionar los miembros del cúmulo y determinar la composición química de una muestra perteneciente al cúmulo globular Omega Centauri a partir del catálogo GALAH. Para ello, se utilizaron gráficos de abundancia  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$ . Los resultados mostraron que el oxígeno, aluminio y silicio son ricos en su abundancia, mientras que el manganeso es pobre en su abundancia. El sodio, magnesio, titanio, vanadio, cromo, cobalto, níquel, cobre y rubidio tienen una distribución dispersa y muestran estrellas pobres y ricas en ellos. El escandio presenta abundancias concentradas en la escala solar. El cinc es mayoritariamente rico en su abundancia, mientras que el ytrio tiene una distribución dispersa. La distribución espacial de las estrellas varía según el elemento químico y su abundancia. Es posible que la diversidad química se deba a procesos de auto enriquecimiento o la agregación de grupos más pequeños con diferentes historias y composiciones químicas.

Se concluyó que, el estudio realizado con GALAH, demuestra como la abundancia química de las estrellas en el cúmulo varía significativamente en función de la gravedad superficial. Además, se ha observado que algunas estrellas con la misma gravedad superficial tienen diferentes abundancias de elementos. Ahora bien, estas diferencias podrían ser el resultado de procesos que afectan la abundancia. Por ejemplo, las estrellas con metalicidades superiores a la solar pueden haberse formado a partir de nubes moleculares que ya contenían una mayor proporción de metales. Por otro lado, las estrellas con metalicidades inferiores a la solar pueden haberse formado a partir de nubes moleculares más antiguas y pobres en metales. Cabe destacar que la abundancia química revela una correlación entre la gravedad superficial y las abundancias de ciertos elementos químicos. Las estrellas con gravedades superficiales altas tienen mayores abundancias de algunos elementos, como por ejemplo el oxígeno, sodio y vanadio, mientras que las estrellas con gravedades bajas tienen mayores abundancias de magnesio, silicio, potasio, calcio, escandio y titanio.

Para finalizar, se observa que la abundancia química de ciertos elementos en Omega Centauri varía con la temperatura de la estrella. Aunque existe dependencia con la temperatura en algunos elementos químicos, la temperatura representa un factor influyente en la formación de elementos en el núcleo estelar. Sin embargo, la relación entre la temperatura y la abundancia química puede ser compleja al igual que con la gravedad superficial debido a otros factores como la masa, la edad y la evolución estelar. En consecuencia, la relación precisa entre la temperatura y la abundancia química depende de múltiples factores y no puede ser simplificada a uno solo. Por último, dada la complejidad química en Omega Centauri y la cantidad de estrellas que lo conforman, es necesario realizar este tipo de estudios hasta que se logre precisar la composición química de todo el cúmulo.

### Conflicto de intereses.

La autora declara que no tiene conflicto de intereses.

## Referencias

1. Kuzma, P., Ferguson, A. y Peñarrubia, J. (2021). Detecting Globular Cluster Tidal Extensions with Bayesian Inference: I. Analysis of  $\omega$  Centauri with Gaia EDR3. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(1): 1127-1137. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2280>
2. Jang, S., Milone, A.P., Legnardi, M.V., Marino, A.F., Mastrobuono-Battisti, A., Dondoglio, E., Lagioia, E.P., Casagrande, L., Carlos, M., Mohandas, A., Cordoni, G., Bortolan, E. y Lee, Y.W. (2022). Chromosome maps of Globular Clusters from wide-field ground-based photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517(4): 5687-5703. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3086>
3. Caldwell. Hubbel`s Caldwell Catalog USA. NASA/ESA. (2019). Disponible en: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/caldwell-80>
4. Johnson, C.I., Dupree, A.K., Mateo, M., Bailey, J.I., Olszewski, E.W. y Walker, M.G. (2020). The Most Metal-poor Stars in Omega Centauri (NGC 5139). *The Astronomical Journal*, 159(6). <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab8819>
5. Hema, B.P., Pandey, G., Kurucz, R.L. y Prieto, C.A. (2020). Helium Enhancement in the Metal-rich Red Giants of  $\omega$  Centauri. *The Astrophysical Journal*, 897(1). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab93bd>
6. Mucciarelli, A., Monaco, L., Bonifacio, P., Salaris, M., Saviane, I., Lanzoni, B., Momany, Y. y Lo Curto, G. (2021). Curiouser and curiouser: The peculiar chemical composition of the Li and Na-rich star in  $\omega$  Centauri. *Astronomy & Astrophysics*, 652. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140796>
7. Johnson C.I. y Pilachowski C.A. (2010). Chemical Abundances for 855 Giants in the Globular Cluster Omega Centauri (NGC 5139). *The Astrophysical Journal*, 722(2). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1373>
8. Riello, M., et al. (2021). GAIA Early Data Release 3. Photometric content and validation. *Astronomy & Astrophysics*, 649. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039587>

9. Brown, A., *et al.* (2021). GAIA Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 649. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039657>
10. Babusiaux, C., *et al.* (2022). GAIA Data Release 3. Catalogue Validation. *Astronomy & Astrophysics*, 674. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243790>
11. Buder, S., *et al.* (2021). The GALAH+ survey: Third data release. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 506(1): 150-201. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1242>
12. Carrera, R., Bragaglia, A., Gaudin, C., Vallenari, A., Balaguer, L., Bossini, D., Casamiquela, L., Jordi, C., Sordo, R. y Soubiran, C. (2019). Open clusters in APOGEE and GALAH. Combining Gaia and ground-based spectroscopic surveys. *Astronomy & Astrophysics*, 623. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834546>
13. Stetson, P. (2000). Homogeneous Photometry for Star Clusters and Resolved Galaxies. II. Photometric Standard Stars. *The Astronomical Society of the Pacific*, 112(773): 925-931. <https://doi.org/10.1086/316595>
14. Ivezić Z., *et al.* (2007). A Comparison of SDSS Standard Star Catalog for Stripe 82 with Stetson's Photometric Standards. *The future of photometric, spectrophotometric and polarimetric standardization*, 999: 1-11. <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0701508>
15. Rowell, N., *et al.* (2021). Gaia Early Data Release 3. Modelling and calibration of Gaia's point and line spread functions. *Astronomy & Astrophysics*, 649. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039448>
16. Buder *et al.*, (2021). Este trabajo hizo uso de la Tercera Publicación de Datos de la Encuesta GALAH. La Encuesta GALAH se basa en datos adquiridos a través del Observatorio Astronómico Australiano, bajo programas: A / 2013B / 13 (La encuesta piloto de GALAH); A / 2014A / 25, A / 2015A / 19, A2017A/18 (La fase de encuesta de GALAH 1); A2018A / 18 (Grupos abiertos con HERMES); A2019A / 1 (Formación de estrellas jerárquicas en Ori OB1); A2019A / 15 (La fase GALAH/19, A / 2016A / 22, A / 2016B / 10, A / 2017B / 16, A / 2018B / 15 (El programa HERMES-TESS); y A / 2015A / 19, A, A / 2016B / 12, A / 2017A / 14 (El programa de seguimiento HERMES K2).
17. Agencia Espacial Europea (ESA) s.f. Este trabajo ha utilizado datos de la misión GAIA de la Agencia Espacial Europea (ESA) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), procesado por el Consorcio de Análisis y Procesamiento de Datos de GAIA (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). La financiación para el DPAC ha sido proporcionada por instituciones nacionales, en particular las instituciones que participan en el Acuerdo Multilateral de GAIA.
18. Smith, V., *et al.* (2000). The chemical evolution of the globular cluster u centauri (NGC 5139). *The Astronomical Journal*, 119: 1239-1258. Disponible en: <https://doi.org/10.1086/301276>
19. Gratton, R., Johnson, C.I., Lucatello, S., D'Orazi, V. y Pilachowski C. (2011). Multiple populations in  $\omega$  Centauri: a cluster analysis of spectroscopic data. *Astronomy & Astrophysics*, 534: 1-13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117093>



Este artículo forma parte del proyecto "Guía práctica para la enseñanza de la Astronomía en el estado Trujillo, Venezuela", financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA), identificado con el código NURR-H-572-15-04-B.

Agradecimiento a la Primera Escuela Latinoamericana de Gaia, Universitat de Barcelona (España) – Universidad de Antioquia (Colombia) 2022, por la información proporcionada.

---

El artículo presenta una contribución significativa al campo al unificar la corrección fotométrica y la selección de candidatos a miembros basada en movimientos propios. Esta integración permite la identificación de los miembros del cúmulo globular Omega Centauri sin depender de muestras previas de otras investigaciones. Además, la autora aplica el método de análisis de abundancias químicas, utilizado previamente en otros objetos celestes, para examinar uno de los cúmulos más densos y complejos de la Vía Láctea, proporcionando así información desde otra perspectiva sobre su evolución.

**Mariluz Graterol Ruiz**  
Universidad de Los Andes  
Profesora Asistente, Núcleo Universitario  
"Rafael Rangel"  
practicageologia2012@gmail.com