



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
LICENCIATURA en ASTRONOMÍA

**Colores intrínsecos y extinciones de estrellas RR Lyrae
en el sistema fotométrico de Gaia**

Trabajo de Iniciación a la Investigación

Autor: **Valeria Romero**
Tutor: **Dra. Cecilia Mateu**

Montevideo, julio de 2021

Resumen

En este trabajo se propuso obtener la calibración color-período de las estrellas RR Lyrae del catálogo Specific Objects Study de Gaia con el fin de calcular distancias más confiables en zonas de extinción variable. Las RR Lyrae son estrellas variables pulsantes típicamente utilizadas como estándares de luminosidad: permiten la determinación de distancias a partir de su magnitud aparente y su magnitud absoluta conocida. En años recientes se han utilizado como estándares de color, ya que a partir de su período se pueden predecir los colores intrínsecos en la fase de mínimo brillo del ciclo de pulsación, con lo que se puede obtener de manera precisa la extinción en la línea de visión hasta la estrella. Esto es deseable en regiones de la Galaxia a bajas latitudes y en zonas de alta densidad estelar donde la extinción es alta y variable. Es fundamental un buen conocimiento de la extinción en la Galaxia para obtener distancias confiables.

Se calibró la relación color-período, válida para ambos tipos de RR Lyrae (*ab* y *c*), para los tres colores posibles con las bandas de Gaia ($BP - RP$), ($BP - G$) y ($G - RP$) mediante la definición de un conjunto de 2372 estrellas calibradoras: estrellas brillantes a alta latitud galáctica con un número mínimo de observaciones en la fase de mínima luz (intervalo de fases $\phi \in [0.4, 0.7]$). Se eligió el color $(BP - RP)_{0,min}$ como color estándar para el cálculo de extinciones, cuyo error se estimó en 0.084 mag (mediana) para las estrellas calibradoras. Se mostró que este método permite calcular distancias más exactas, corrigiendo el efecto “Finger of God” en el disco Galáctico y en las Nubes de Magallanes.

Agradecimientos

A mi tutora Cecilia por todo lo que me enseñó en esta etapa de mi formación. Por escucharme, darme consejos y motivarme cuando más lo necesitaba. Por emocionarse con cada uno de mis avances. Por crear una experiencia enriquecedora, memorable y llena de aprendizaje.

Al Instituto de Física por prestarme lo esencial para realizar este trabajo: una computadora y un escritorio en la oficina.

A mis amigos Camila, Joaquín y Marcos por ser mi red de contención y una fuente constante de motivación en mi vida. Por las idas a la rambla, las fiestas, y los viajes. Por las comidas, los cafés y los mates. Por los abrazos, las risas y las lágrimas. Por estudiar conmigo para los exámenes. Por acompañarme en mis crisis existenciales.

A Diego por creer en mí. Por confortarme y asegurarme de que todo saldría bien.

A mis padres por querer lo mejor para mí y motivarme desde siempre a estudiar lo que más me gusta.

A mis gatos Manchi, Lolo (a.k.a. Bicho Feo) y Negri por todas las veces que me sacaron una sonrisa. Por todas las siestas que dormimos juntos. Por enseñarme lo que es amar. Por acompañarme.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	6
2	RR Lyrae de Gaia	7
2.1	Características de Gaia	7
2.1.1	Detectores	8
2.2	Datos de Gaia	9
2.3	El catálogo SOS	13
2.3.1	Curvas de luz y color observado	15
3	Calibración de colores intrínsecos en mínima luz	19
3.1	Desenrojecimiento inicial de las estrellas RR Lyrae con SFD98	20
3.2	Colores observados e intrínsecos en fase de mínima luz	23
3.3	Análisis de los residuos del conjunto preliminar de estrellas calibradoras	26
3.4	Relación color-período del conjunto final de estrellas calibradoras	27
3.4.1	Comparación con trabajos anteriores	29
4	Extinciones y distancias	31

4.1	Las extinciones de estrellas RR Lyrae en la Galaxia y en las Nubes de Magallanes	34
5	Conclusiones	40

Índice de figuras

1.1	Curvas de luz en el sistema fotométrico <i>ugriZ</i> , usados por el Sloan Digital Sky Survey, de una estrella <i>RRab</i> (izquierda) y una estrella <i>RRc</i> (derecha). Tomado de: Catelan & Smith (2015)	3
1.2	Distribución esquemática de diferentes tipos de estrellas pulsantes en el diagrama H-R. Tomado de: Catelan & Smith (2015)	5
2.1	Ley de escaneo de Gaia. Tomado de ESA Gaia Science Community	8
2.2	Plano focal de Gaia. Tomado de: Riello et al. (2018)	10
2.3	Bandas fotométricas de Gaia (arriba; Evans et al., 2018), Johnson-Cousins (medio; Bessell, 2005), y DES (abajo; DES Collaboration et al., 2005).	11
2.4	Procesamiento de datos de variabilidad de Gaia DR2. Tomado de: Holl et al. (2018)	13
2.5	Distribución de estrellas RRL en el cielo. Coordenadas galácticas. El color es proporcional al número de observaciones en G.	15
2.6	Fracción sobre el total de estrellas contra número de observaciones (izquierda). Error en magnitud contra magnitud en las tres bandas de Gaia para 500 estrellas (derecha).	16
2.7	Número de observaciones contra error en magnitud aparente en cada banda (izquierda). Curvas de luz (derecha).	17
2.8	Curvas de luz de estrellas RRL. Las curvas en la banda <i>BP</i> han sido trasladadas por un factor arbitrario para evitar solapamiento con las de <i>G</i> y <i>RP</i>	18

3.1	Ley de extinción válida para nuestra Galaxia. Tomado de Salaris & Cassisi (2005)	21
3.2	Esquema de la extinción sobre una línea de visión.	22
3.3	Curvas de color intrínseco de RR Lyrae tipo <i>ab</i> (izquierda) y de tipo <i>c</i> (derecha).	24
3.4	Curvas de color intrínseco en los tres colores de Gaia de 30 estrellas RR Lyrae de tipo <i>ab</i> (izquierda) y de tipo <i>c</i> (derecha).	25
3.5	Análisis de los residuos del conjunto preliminar de estrellas calibradoras en diferentes variables.	28
3.6	Relación color-período del conjunto final estrellas calibradoras. En azul: 1776 RR <i>ab</i> . En naranja: 596 RR <i>c</i> . En verde: ajuste polinómico de segundo orden.	30
4.1	Fracción sobre el total de estrellas contra extinción.	32
4.2	Resta de la extinción de SFD98 y de Gaia como función de la extinción de SFD98 , y de la latitud galáctica.	35
4.3	Mapa de extinción $A_G^{E(BP-RP)}$ (arriba) y $A_G^{E(B-V)}$ (abajo) de las estrellas RRL de Gaia, filtradas por las extinciones negativas, las extinciones no confiables, y las medidas con errores sistemáticos en la fotometría <i>BP</i> y <i>RP</i>	36
4.4	Extinción de estrellas en el Disco Galáctico ($ z < 1$ kpc).	37
4.5	Distancia contra ascensión recta de estrellas en la dirección de las Nubes de Magallanes en función de la extinción.	38

Índice de tablas

1.1	Calibraciones de los colores en mínima luz de estrellas RRL, disponibles en la literatura.	6
3.1	Parámetros usados para el cálculo de coeficientes de extinción de Gaia como función de color y extinción, tomados de Gaia Collaboration et al. (2018a)	22
3.2	Coefficientes x_i del ajuste parabólico de la relación color-período (Ec. 3.5) y desviación estándar de los residuos σ_R	29
3.3	Valores rms del ajuste parabólico y del ajuste lineal de la relación color-período para las 47 estrellas RRab y las 14 RRc, respectivamente, para los colores <i>ugriz</i> de DECam (Vivas et al., 2017).	29
4.1	Error en extinción debido al error en color intrínseco para los colores <i>VI</i> de CTIO (Guldenschuh et al., 2005), <i>ugriz</i> de DECam (Vivas et al., 2017) y <i>G, BP, RP</i> de Gaia.	33
4.2	Extracto de la tabla final con extinciones y distancias reportadas. f_1, f_2, f_3 son los flags <code>flag_num_min</code> , <code>flag_calibradora</code> , <code>flag_confiabilidad</code> . A_G es la extinción $A_G^{E(BP-RP)}$	39

Capítulo 1

Introducción

Las estrellas RR Lyrae (RRL) son variables pulsantes que han sido de mucha utilidad en la astrofísica moderna: han aportado a la teoría evolutiva de estrellas de baja masa y a la teoría de pulsación de estrellas; se han utilizado como trazadores de poblaciones estelares viejas, dando pistas sobre la química y la dinámica de la Galaxia; y se han utilizado como candelas estándar para calcular distancias al centro Galáctico, a cúmulos globulares y a sistemas dentro del Grupo Local (Smith, 1995).

Las RRL son estrellas con masas de $0.6 - 0.8 M_{\odot}$ que han salido de la secuencia principal, han recorrido la rama de las gigantes rojas y han llegado a la rama horizontal (HB) del diagrama HR luego de (al menos) 10 Ga^1 de evolución (Catelan & Smith, 2015). Son estrellas gigantes con radios de $4 - 6 R_{\odot}$ y tipos espectrales $A6 - F7$ (Catelan & Smith, 2015), lo cual corresponde a un color ($V - R$) en el rango $0.08 - 0.31$ y una temperatura efectiva entre $6100 - 7400 \text{ K}$ (Mateu & Vivas, 2011). Se encuentran en la HB, generando energía en sus núcleos mediante la fusión estable de He en C y O, y mediante la fusión de H en He en una capa concéntrica alrededor del núcleo. Las estrellas RRL se producen en la zona de la HB intersectada por la franja de inestabilidad del diagrama HR (Figura 1.2), una región ocupada por varios tipos de estrellas pulsantes. Esta intersección ocurre en poblaciones estelares viejas ($\geq 10 \text{ Ga}$) y pobres en metales ($-2.5 \lesssim [Fe/H] \lesssim -0.5$), por lo que las estrellas RRL se suelen encontrar en este tipo de población (Catelan & Smith, 2015).

Las pulsaciones radiales generan una variabilidad fotométrica con períodos entre 0.2 y 1.1 d (Smith, 1995). Las RRL se clasifican según su curva de luz: las RRab pulsan en el modo fundamental y sus curvas son asimétricas con una subida empinada al máximo y una bajada más suave después del máximo (Figura

¹1 Ga= 10^{10} años

1.1, izquierda). Tienen períodos entre 0.4 y 1.1 d y amplitudes entre 0.5 y 1.6 mag en V . Las RRc pulsan en el primer modo excitado y sus curvas son casi sinusoidales (Figura 1.1, derecha). Tienen períodos entre 0.2 y 0.5 d y sus amplitudes están entre 0.2 y 0.7 mag en V (Mateu & Vivas, 2011). El comportamiento de las curvas de luz (que para cada tipo de RRL es idéntico en diferentes bandas fotométricas excepto que con diferentes amplitudes, como se aprecia en la Figura 1.1) y los rangos de períodos, amplitudes y colores son bien conocidos, permitiendo una identificación confiable de estas estrellas una vez que su variabilidad fotométrica es reconocida y caracterizada.

En la banda V existe una relación lineal entre la magnitud absoluta M_V y la metalicidad $[Fe/H]$ (Muraveva et al., 2018b). Para diferentes metalicidades la luminosidad varía poco en la HB por lo que el comportamiento de M_V es prácticamente constante. En bandas más rojas o más azules, la magnitud absoluta sigue una relación lineal con la metalicidad $[Fe/H]$ y con el logaritmo del período; esta relación es habitualmente conocida como relación Período-Luminosidad-Metalicidad (Muraveva et al., 2018b). Esto caracteriza a las RRL como candelas estándar: permite la determinación de distancias a partir de su magnitud aparente y su magnitud absoluta conocida.

Las estrellas RRL, además de ser candelas estándar, son también estándares de color. Sturch (1966) demostró que los colores intrínsecos en la fase de mínima luz del ciclo de pulsación de una RRL se pueden predecir a partir del período de pulsación: esta relación color-período se conoce como la calibración de los colores intrínsecos en mínima luz. Esta propiedad es útil ya que al comparar el color observado en mínima luz con el color intrínseco se puede obtener el enrojecimiento y por tanto la extinción en la línea de visión hasta la estrella. En regiones de la Galaxia a bajas latitudes y en zonas de alta densidad estelar el enrojecimiento es alto y variable, por lo que es fundamental contar con un método preciso para calcularlo. Sin un buen conocimiento de la extinción en la Galaxia no es posible obtener distancias confiables. La medición de la extinción en la línea de visión hasta cada estrella RRL obtenida a partir de sus colores intrínsecos en mínima luz resulta ser una herramienta más potente y de mayor confiabilidad que los mapas 2D de extinción, que dan la extinción en toda la línea de visión, como el mapa de Schlegel et al. (1998, SFD98), que será explicado en más detalle en el Capítulo 3.

Esta propiedad define a las RRL como muy buenos estándares de color, lo que se ha demostrado en varios trabajos previos. La Tabla 1.1 resume todos los trabajos previos en los que se han calibrado los colores intrínsecos de distintas muestras de estrellas RRL en sistemas fotométricos diferentes. En el trabajo de Sturch (1966) se observó que para más de 100 RRab de campo los colores intrínsecos UBV son constantes en la fase de mínima luz (intervalo de fase $0.5 < \phi < 0.8$). Se obtuvo una relación entre el período y el color intrínseco $(B - V)_{0,c}$ corregido por efectos de line blanketing (el atenuamiento de la parte azul del espectro causado por millones de líneas de absorción de elementos pesados: los colores más azules son sensibles

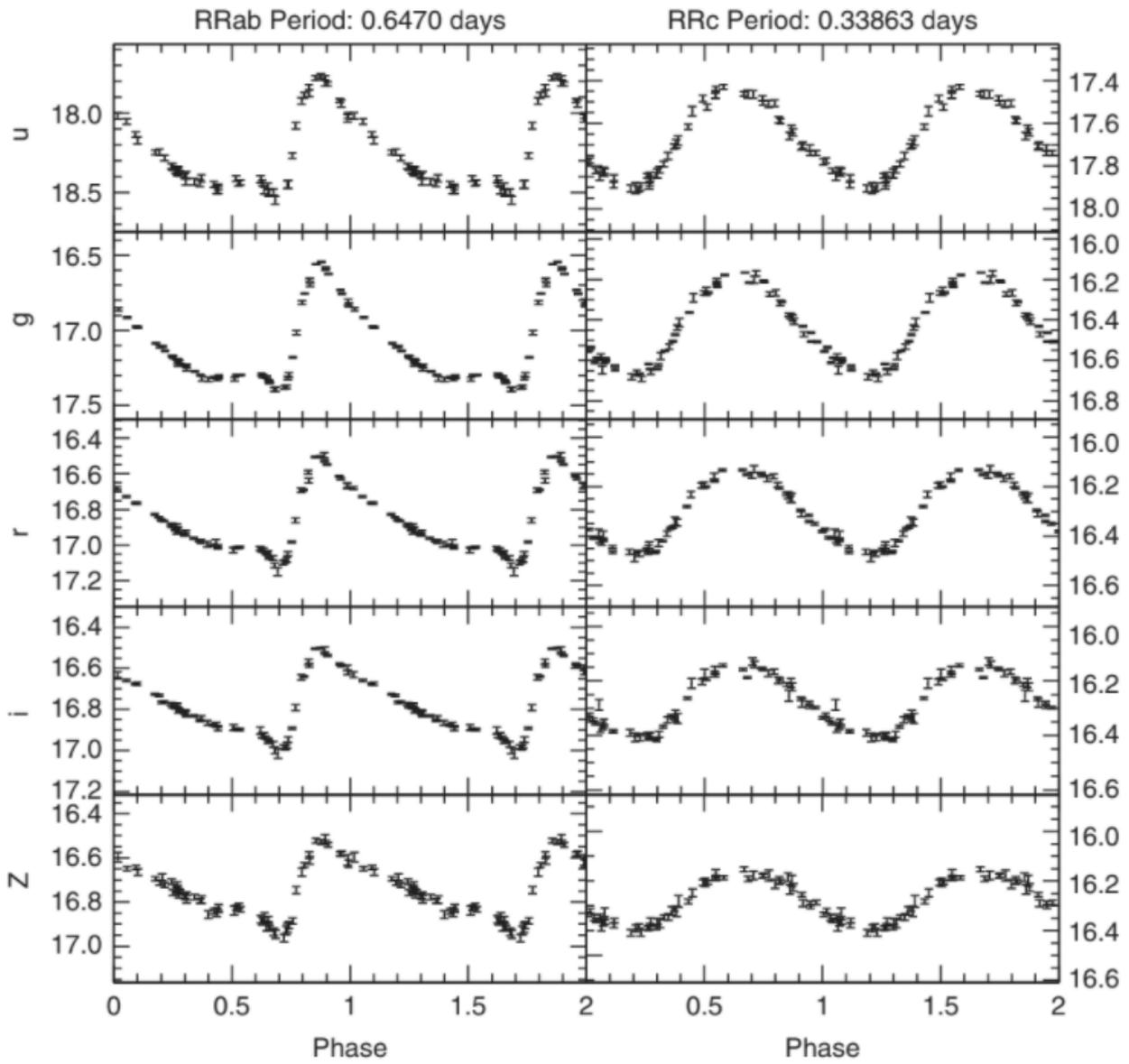


Figura 1.1: Curvas de luz en el sistema fotométrico *ugriZ*, usados por el Sloan Digital Sky Survey, de una estrella RRab (izquierda) y una estrella RRc (derecha). Tomado de: [Catelan & Smith \(2015\)](#).

a la composición química estelar), para estrellas *RRab* a alta latitud. Con la calibración, y adoptando un $E(B - V) = 0.03$ mag característico para estas estrellas a alta latitud galáctica, se obtuvieron los colores intrínsecos individuales en *UBV* para las RRL. En un trabajo más reciente, [Blanco \(1992\)](#) verificó que el color $(B - V)_{0,c}$ se puede estimar a partir del período de pulsación. Obtuvo una relación de color-período para 22 *RRab* haciendo un ajuste de mínimos cuadrados para el período. En el trabajo de [Guldenschuh et al. \(2005\)](#) se obtuvieron los colores intrínsecos en *BVI* en la fase de mínima luz para 6 *RRab* de campo, habiendo utilizado el mapa de extinción de SFD98 para desenrojecer los colores observados. [Kunder et al. \(2010\)](#) probaron dos definiciones igualmente válidas de colores en mínima luz: usando la descomposición de Fourier de las curvas de luz; y calculando el promedio del color intrínseco en fase de mínima luz. Dichos autores obtuvieron el color medio $(V - R)$ desenrojecido en mínima luz para 31 estrellas *RRab*. En el trabajo más reciente disponible a la fecha, [Vivas et al. \(2017\)](#) obtuvieron los colores intrínsecos de 47 *RRab* y 14 *RRc* del cúmulo globular M5 en el sistema fotométrico *ugriz* de DECam. Este es el primer trabajo en que se calibraron los colores intrínsecos para las RRL tipo *c*. Cambiando la definición de fase de mínima luz a $\phi = 0.65$, obtenido del ajuste de plantillas de las curvas de luz, obtuvieron una relación de color-período diferente para cada tipo de RRL, utilizando el período fundamentalizado para las *RRc*. El desenrojecimiento de los colores observados se hizo también con el mapa de extinción de SFD98 y los coeficientes de la ley de extinción actualizados por [Schlafly & Finkbeiner \(2011\)](#). Estos autores demostraron, además, que los colores más rojos *riz* evitan la dependencia con la metalicidad.

Las calibraciones de los colores en mínima luz disponibles en la literatura se han realizado en los sistemas fotométricos de Johnson *UBVRI*, usados históricamente en numerosos estudios de estrellas variables como los sondeos QUEST RR Lyrae Survey I y III ([Vivas et al., 2004](#); [Mateu et al., 2012](#)), que cubren 380 deg^2 y 476 deg^2 , con curvas de luz para 498 RRL en *V* y 221 RRL en *VRI*, respectivamente; el sondeo OGLE IV ([Udalski et al., 2015](#)), que cubre más de 3000 deg^2 , y tiene curvas de luz para más de 65 mil RRL en *VI*; ASAS SN-II ([Jayasinghe et al., 2019](#)), que cubre todo el cielo, y tiene curvas de luz para ~ 44 mil RRL en *V*; y, más recientemente, DECam *grizy*, filtros empleados por la amplia mayoría de los sondeos de estrellas variables más extensos con observaciones multi-época en más de un filtro: SDSS Stripe 82 ([Sesar et al., 2010](#)), con fotometría en *ugriz* para 483 RRL, que cubre $\sim 280 \text{ deg}^2$; Pan-STARRS1 ([Sesar et al., 2017](#)), que cubre $\frac{3}{4}$ del cielo, con fotometría en *griz* para ~ 61 mil RRL; o DES ([Stringer et al., 2019](#)), que cubre $\frac{1}{8}$ del cielo, y tiene fotometría en *griz* para 5783 *RRab*.

En la actualidad, el mayor sondeo de estrellas variables disponible es el de la misión astrométrica Gaia. Éste es un sondeo que en su versión actual (Gaia DR2) tiene una cobertura de todo el cielo y cuenta con una muestra de 1.7 mil millones de estrellas más brillantes que $G = 20.7$, de las cuales 550 mil estrellas son variables. Es por esto que en este trabajo nos proponemos calibrar los colores intrínsecos en mínima

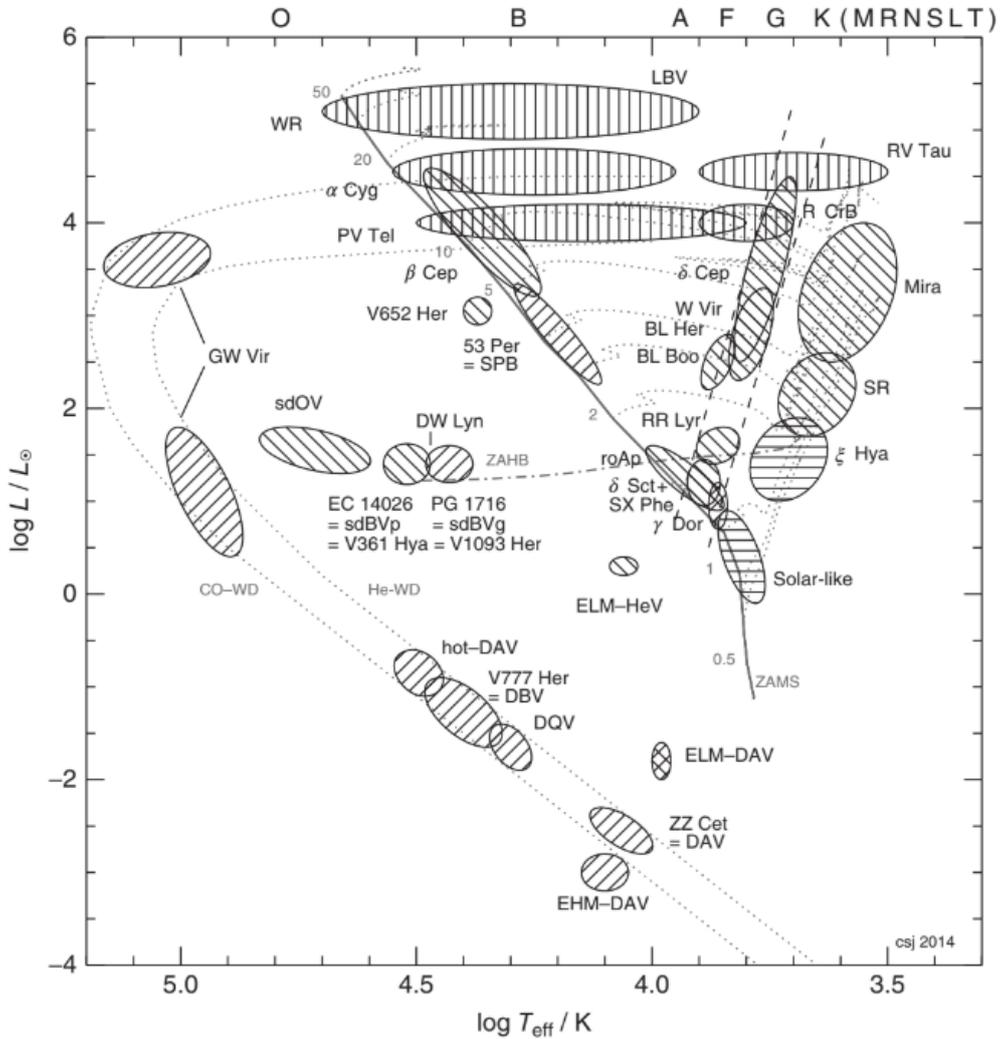


Figura 1.2: Distribución esquemática de diferentes tipos de estrellas pulsantes en el diagrama H-R. Tomado de: [Catelan & Smith \(2015\)](#).

luz de estrellas RRL en el sistema fotométrico G, BP, RP de Gaia. Esta calibración nos permitirá calcular distancias más robustas, particularmente para las RRL en zonas de extinción muy variable como el plano galáctico y las Nubes de Magallanes.

Referencias	Muestra	Sistema fotométrico	ab	c
Sturch (1966)	100 RRL de campo	Johnson - <i>UBV</i>	✓	✗
Blanco (1992)	22 RRL	Johnson-Cousins - <i>BV</i>	✓	✗
Guldenschuh et al. (2005)	6 RRL de campo	Johnson-Cousins - <i>BVI</i>	✓	✗
Kunder et al. (2010)	31 RRL de campo	Johnson-Cousins - <i>BVR</i>	✓	✗
Vivas et al. (2017)	61 RRL de M5	DECam - <i>ugriz</i>	✓	✓

Tabla 1.1: Calibraciones de los colores en mínima luz de estrellas RRL, disponibles en la literatura.

1.1. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo consiste en calibrar los colores intrínsecos de estrellas RR Lyrae en el sistema fotométrico de Gaia y utilizarlos en el cálculo de extinciones y distancias a todas las estrellas RR Lyrae del sondeo.

Siendo éste el objetivo general, los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

- Calibrar los colores intrínsecos en las bandas de Gaia
- Caracterizar las distintas fuentes de incertidumbre y analizar la dependencia de los colores con el período
- Comparar resultados con la literatura
- Calcular la extinción y distancia individual para las RR Lyrae de Gaia
- Estudiar la dependencia de la extinción con la distancia en zonas de alta y variable extinción

Este trabajo se divide de la siguiente forma: en el Capítulo 2 presentamos las características principales y los datos de la misión Gaia, el catálogo que utilizamos, y la construcción de las curvas de luz y las curvas de color de las RRL. En el Capítulo 3 se detalla el proceso de la calibración de los colores intrínsecos en la fase de mínima luz de las RRL. En el Capítulo 4 calculamos la extinción y la distancia a cada estrella individual, comparamos nuestro mapa de extinción con el de [SFD98](#), y estudiamos la dependencia de la extinción con la distancia. En el Capítulo 5 presentamos las conclusiones.

Capítulo 2

RR Lyrae de Gaia

En este capítulo se describen las características principales de la misión Gaia, siendo éstas el funcionamiento del satélite, el funcionamiento de sus instrumentos, los catálogos lanzados por la misión, y los catálogos que se utilizan en este trabajo. Finalmente, se describe la construcción de las curvas de luz, las curvas de color, y la medición de los colores en mínima luz de las estrellas RR Lyrae de Gaia DR2.

2.1. Características de Gaia

Un resumen de las principales características de la misión y el sondeo Gaia se encuentra en las páginas web *ESA Science & Technology*¹ y *ESA Gaia Science Community*². Los detalles técnicos se describen en [Gaia Collaboration et al. \(2018b\)](#). Con un sondeo de mil millones de estrellas el objetivo de la misión Gaia es crear el mapa 3D más grande y más preciso de la Galaxia. Observando desde una órbita de tipo Lissajous alrededor del punto L2 del sistema Sol-Tierra-Luna, durante su vida operativa nominal de 5 años el satélite obtendrá datos de astrometría, fotometría y espectrometría de objetos en todo el cielo. El instrumento que cumple estas tres funciones comprende dos telescopios con un plano focal compartido; para cada función hay un área dedicada en la matriz de CCD.

Gaia completa un período de rotación cada 6 horas, girando sobre su propio eje con una velocidad constante de 60 arcsec/s, observando en modo rastreo (drift-scan, en inglés). De esta forma, los dos campos de visión astrométricos observan los objetos a lo largo del círculo máximo perpendicular al eje de rotación, como se aprecia en la Figura 2.1. Los dos campos de visión están separados por un ángulo fijo de 106.5°. Debido

¹<https://www.sci.esa.int/web/gaia>

²<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>

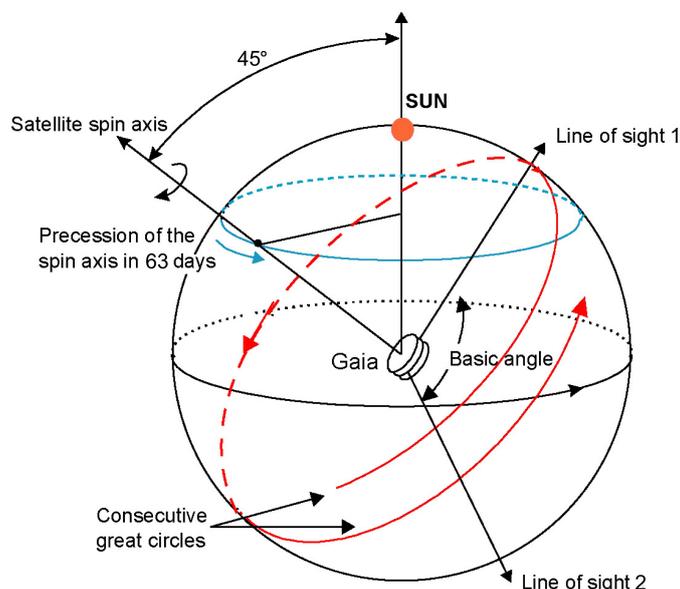


Figura 2.1: Ley de escaneo de Gaia. Tomado de [ESA Gaia Science Community](#).

a esto, los objetos son observados por el segundo campo de visión con un retraso de 106.5 minutos en comparación con el primero.

La ley de escaneo describe cómo el eje de rotación del satélite cambia con el tiempo durante la misión. En el caso de Gaia la ley de escaneo comprende un escaneo giratorio: el eje de giro precesa alrededor de la dirección solar con un ángulo fijo de 45° , y escanea el cielo a lo largo de círculos máximos. La velocidad de precesión es tal que 5 años de operación corresponden a 29 revoluciones del eje de rotación alrededor de la dirección solar, equivalente a un período de precesión de 63 días. Como consecuencia, cuando se acabe su vida operativa los escaneos consecutivos se superpondrán lo suficiente como para obtener una cobertura completa del cielo, y se observará cada objeto unas 70 veces en promedio.

2.1.1. Detectores

La Figura 2.2 muestra una representación del plano focal, que cuenta con 106 CCD, con un total de casi mil millones de píxeles, y tiene dimensiones físicas de $1.0\text{m} \times 0.4\text{m}$. Incluye un área dedicada a cada detector y a la metrología y alineamiento de la sonda. Los diferentes detectores se detallan a continuación: el *Sky Mapper* (SM), que contiene 14 CCDs (7 por telescopio), detecta autónomamente los objetos de hasta magnitud 20.7 que ingresan a los campos de visión y comunica los detalles del pasaje de las estrellas por el plano focal a los CCD subsecuentes; el campo astrométrico principal (AF), que cubre 62 CCD, obtiene imágenes de luz blanca en la banda *G* de Gaia en el rango de 330 – 1050 nm de longitud de onda.

El análisis posterior (en Tierra) de estas imágenes permite calcular la solución astrométrica simultánea para todo el catálogo que proporciona cinco parámetros astrométricos para cada estrella: la posición (dos ángulos), el movimiento propio (dos derivadas temporales de la posición) y la paralaje (distancia) de todos los objetos hasta magnitud 20.7. La primera tira de siete detectores (AF1) también sirve para confirmar objetos; los fotómetros azul y rojo (BP y RP) obtienen medidas espectro-fotométricas de baja resolución de las distribuciones espectrales de energía para cada objeto hasta magnitud 20.7 en los rangos de 330 – 680 nm y 630 – 1050 nm, respectivamente. Cada fotómetro contiene 7 CCD. En la Figura 2.3 se encuentra la transmisividad en función de la longitud de onda de las bandas de Gaia³ y las de las bandas de Johnson-Cousins y de DES⁴ para comparar. Finalmente, el espectrómetro de velocidad radial (RVS), que cubre 12 CCD, provee datos espectrales de alta resolución en la banda estrecha de 845 – 872 nm para el cálculo de la velocidad radial para todos los objetos más brillantes que magnitud 17.

Un objeto observado por el telescopio 1 o el telescopio 2 es registrado por SM1 o SM2, respectivamente. Una vez detectado por SM, el objeto es confirmado en AF1, en donde se eliminan las detecciones falsas como los rayos cósmicos. Luego transita por los CCD restantes en AF, seguido por BP, RP y RVS. Este pasaje por todos los detectores de Gaia es lo que comprende un tránsito por el plano focal.

2.2. Datos de Gaia

La entidad que se encarga de procesar los datos de Gaia, Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC), en lugar de lanzar los datos finales una vez completada la misión (previsto para 2022 – 2023) está lanzando los datos en etapas previas mediante lanzamientos intermedios. Los llamados Data Releases consisten en datos preliminares y en un subconjunto del total, por lo que no son completamente representativos del potencial de Gaia.

El primer lanzamiento de datos de Gaia, Gaia Data Release 1 (Gaia DR1; [Gaia Collaboration et al., 2016](#)), liberado a mediados de 2016, comprende los datos obtenidos en los primeros 14 meses de la misión, procesados por DPAC y convertidos en catálogos de astrometría y fotometría para más de mil millones de fuentes más brillantes que $G = 20.7$. Este lanzamiento de datos consta de tres componentes: la primera componente (Tycho-Gaia Astrometric Solution, TGAS) abarca dos conjuntos de datos de astrometría: el primario con posiciones, paralajes y movimiento propio medio para las 2 millones de estrellas más brillantes en común con el catálogo astrométrico de 2.5 millones de estrellas Tycho-2 obtenido con el satélite Hipparcos ([Høg et al., 2000](#)); el secundario con posiciones de otras 1.1 mil millones de fuentes; la segunda

³Bandas fotométricas de Gaia: https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20180316

⁴Bandas fotométricas de DECam: <http://www.ctio.noao.edu/noao/node/13140>

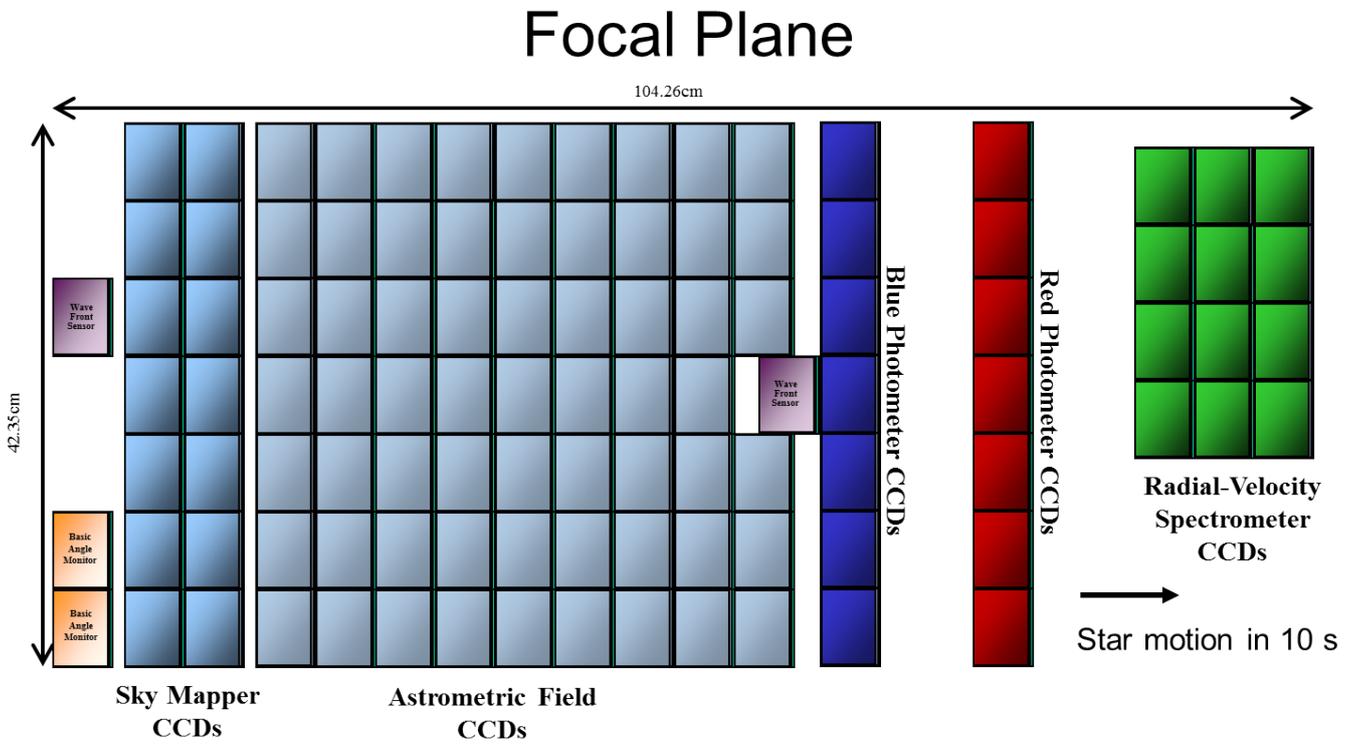


Figura 2.2: Plano focal de Gaia. Tomado de: [Riello et al. \(2018\)](#).

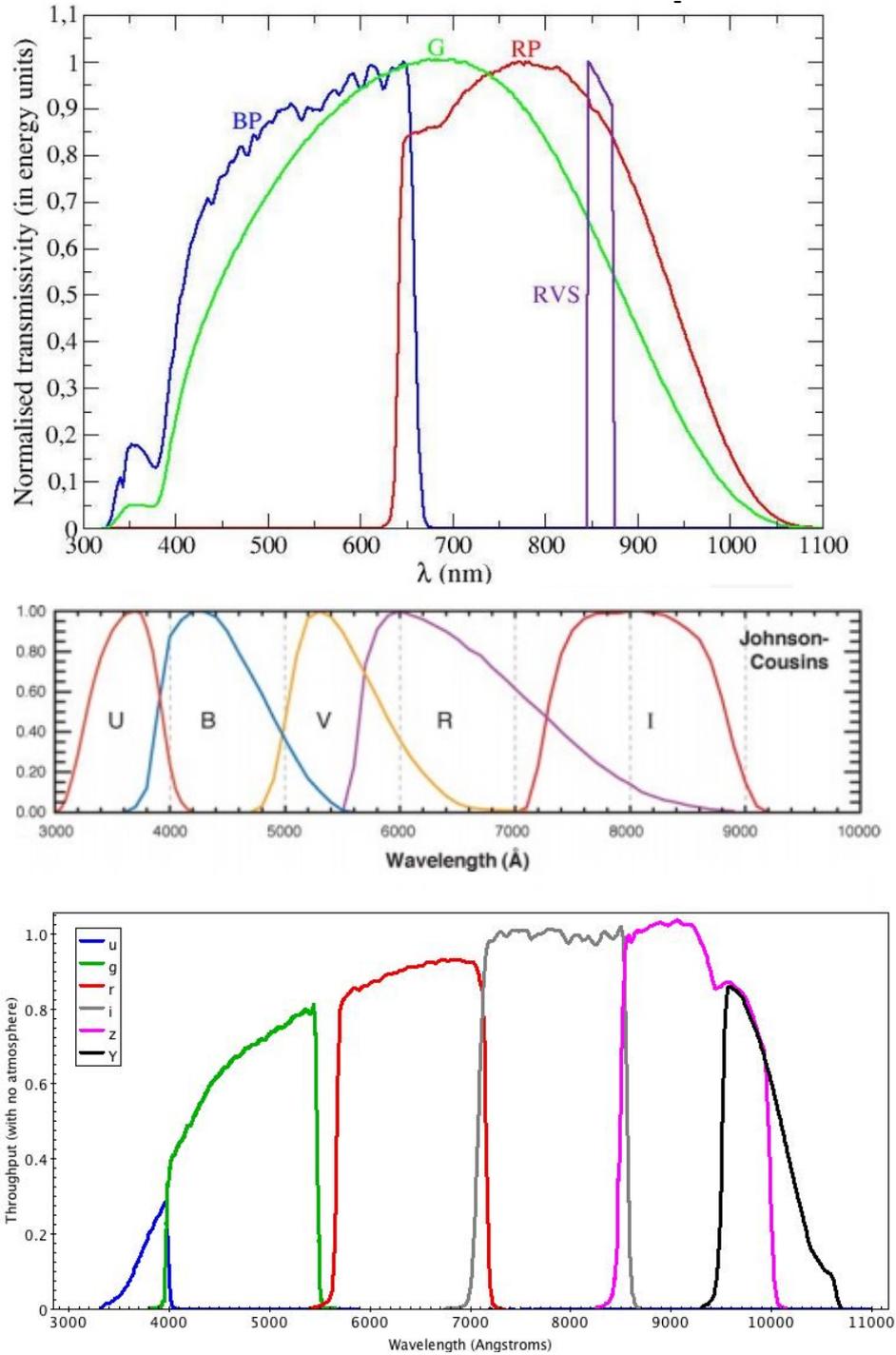


Figura 2.3: Bandas fotométricas de Gaia (arriba; [Evans et al., 2018](#)), Johnson-Cousins (medio; [Bessell, 2005](#)), y DES (abajo; [DES Collaboration et al., 2005](#)).

componente consta de un conjunto de datos fotométricos, con medidas en la banda G para todas las fuentes. No se presentan resultados en BP y RP , ni movimientos propios o paralajes para estas fuentes; la tercera y última componente comprende las curvas de luz en G para unas 3 mil Cefeidas y RR Lyrae observadas en el Polo Eclíptico Sur. Debido a que DR1 no cuenta con observaciones en BP y RP , y a que las estrellas RRL observadas no se distribuyen en todo el cielo, este catálogo no cumple con los requisitos necesarios para llevar a cabo el objetivo de este trabajo.

El segundo lanzamiento de datos de Gaia (Gaia DR2; [Gaia Collaboration et al., 2018b](#)), liberado en abril de 2018, está basado en los primeros 22 meses de la vida operativa de la misión. Contiene posiciones celestes y magnitudes aparentes en G para aproximadamente 1.7 mil millones de fuentes; magnitudes aparentes en BP y RP para 1.4 mil millones de fuentes; paralajes y movimientos propios para 1.3 mil millones de fuentes; velocidad radial para 7 millones de fuentes; e información de variabilidad para 0.5 millones de estrellas. Los resultados se encuentran distribuidos en diferentes tablas publicadas en el *Gaia archive*⁵.

En la tabla principal `gaia_source` se tiene una entrada para cada fuente observada por Gaia. Contiene los parámetros básicos finales de la fuente, es decir, datos astrométricos, fotometría promediada, sus estadísticas asociadas y e indicadores (flags) de validación. No contiene datos por época ni espectros. Los datos por época se encuentran en los resultados publicados por el análisis de variabilidad de 550 mil estrellas variables. Se distribuyen en tablas de clasificación *VariClassifier* y en tablas de *Estudios de Objetos Específicos* (SOS, por sus siglas en inglés), junto con la información de época en las bandas G , BP y RP , y los parámetros estadísticos asociados.

En [Holl et al. \(2018\)](#) se resume el procesamiento de variabilidad de las 0.5 millones de fuentes identificadas como estrellas variables. El esquema del proceso de detección y clasificación de las estrellas variables se presenta en la Figura 2.4. Se indican las dos rutas principales: Por un lado, para cubrir todo el cielo, la clasificación `nTransits:2+` parte de al menos 2 tránsitos en G (izquierda). Los resultados de este clasificador se encuentran en el *Gaia archive* en la Tabla `vari_classifier_result` (VC, [Rimoldini et al., 2019](#)), presentando únicamente la clasificación de las variables. Por otro lado, la clasificación `nTransits:20+` parte de al menos 20 tránsitos en G (derecha), utilizando los resultados de la búsqueda de períodos, obtenidos con modelos de descomposición de Fourier para fuentes identificadas como variables con al menos 5 tránsitos en G . A partir de la combinación de este clasificador con los candidatos del clasificador `nTransits:2+` para fuentes con al menos 12 tránsitos en G se obtuvieron las tablas SOS Cep&RRL y SOS LPV, que contienen respectivamente las estrellas Cefeidas, RRL y variables de largo período (LPV) identificadas por el algoritmo Specific Objects Study (SOS). Con el clasificador `nTransits:20+` también se obtuvieron las demás tablas SOS que se ven en la figura (abajo a la derecha). Los cuadros amarillos de la figura corresponden a los datos

⁵<https://www.gea.esac.esa.int/archive/>

publicados que pasaron por filtros de validación.

Unas 228 mil estrellas RRL fueron clasificadas en VC, y 140 784 fueron confirmadas por SOS Cep&RRL (catálogo SOS de ahora en adelante), de las cuales se clasificaron: 98 026 RR*ab*, 40 380 RR*c*, y 2378 RR*d*. En este trabajo utilizamos los datos de las RRL publicadas en SOS ya que en VC no se presentan datos de los períodos de pulsación ni la información de época de las estrellas, información indispensable para nuestro trabajo ⁶. Estos resultados se encuentran en la tabla `vari_rrlyrae` y en la columna `epoch_photometry` (enlace a las curvas de luz en formato VOTable) de la tabla `gaia_source`.

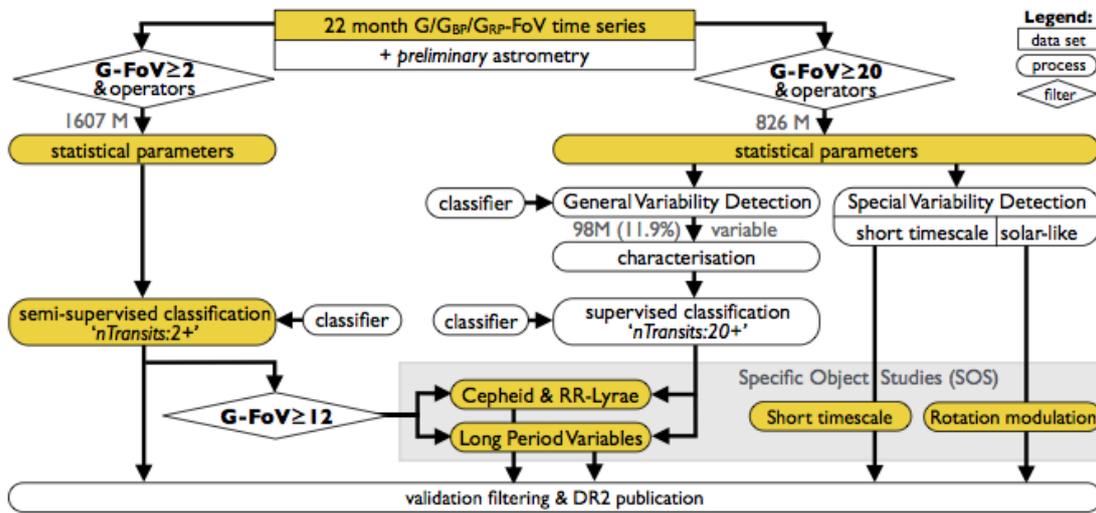


Figura 2.4: Procesamiento de datos de variabilidad de Gaia DR2. Tomado de: [Holl et al. \(2018\)](#).

2.3. El catálogo SOS

Empleando los datos del catálogo SOS buscaremos estrellas brillantes a alta latitud con muchas observaciones con el fin de utilizarlas para la calibración de los colores intrínsecos de las estrellas RRL en el sistema fotométrico de Gaia. Para esto determinaremos los parámetros principales que optimizarán el conjunto de estrellas calibradoras.

En primer lugar, con el buscador ADQL del *Gaia archive* realizamos la intersección de las tablas `gaia_source` (de ahora en adelante GS) y `vari_rrlyrae` (de ahora en adelante SOS) para estrellas con

⁶Después de la culminación de este trabajo se publicó un avance del tercer lanzamiento de datos (Gaia EDR3). Éste lanzamiento no incluye un nuevo catálogo de variables ni ampliaciones de la fotometría de época, por lo que no incluye mejora sustancial respecto de Gaia DR2 en lo que compete al presente trabajo.

el mismo identificador `source_id`⁷. Graficamos las coordenadas galácticas (`l` y `b`, GS) en una proyección de Aitoff. En la Figura 2.5 se aprecia la distribución de estrellas en casi todo el cielo; en particular, nos interesa la identificación de las RRL a altas latitudes. Se puede notar que la distribución no es uniforme: hay arcos de círculos máximos en los que las estrellas cuentan con más observaciones que en otros debido a la ley de escaneo y al lanzamiento de datos preliminares. Como también se puede observar en la Figura 2.6 (izquierda), la gran mayoría de las estrellas (96 %) tienen menos de 60 observaciones en G (`matched_observations`, GS). La mediana de observaciones en G es 28, el mínimo es 12 (por construcción), y el máximo es 254.

Los datos de fotometría de época individuales se obtienen del *Gaia archive* de la tabla `light_curve` (de ahora en adelante EP), mediante `epoch_photometry_url` (en GS). Las observaciones en cada banda para cada tránsito están identificadas en EP con un `transit_id`, que indica que corresponden al mismo tránsito por el plano focal. En la Figura 2.6 (derecha) graficamos el error en magnitud contra la magnitud (`mag`, EP) en las tres bandas de Gaia para 500 estrellas RRL, que tomamos como representativo del total del catálogo. Calculamos el error en magnitud δm a partir del flujo F y su error δF (reportados como `flux` y `flux_error`, EP) como la derivada de $m = -2.5 \log(F) + c$,⁸ obteniendo:

$$\delta m = \frac{2.5}{\ln(10)} \frac{\delta F}{F}. \quad (2.1)$$

En el gráfico se observa que el error en magnitud se dispara sobretodo en las bandas BP , RP a partir de magnitud ~ 18 , alcanzando valores de 0.1 mag. El error en la banda G siempre es mucho menor y aumenta más rápidamente a partir de $G \sim 19$.

Para ilustrar la combinación de características observacionales que estamos buscando en el conjunto de estrellas calibradoras miremos la Figura 2.7 (izquierda), en donde tenemos los errores de las medidas individuales en magnitud (ver Ec. 2.1) en las tres bandas de Gaia para tres estrellas diferentes: la primera está ubicada a una latitud $b = -29^\circ$, tiene 249 tránsitos en la banda G , con magnitud 19 en las tres bandas, y errores del orden de 0.02 mag en G , 0.15 mag en BP y 0.12 mag en RP ; la segunda está ubicada a una latitud $b = 86^\circ$, tiene 63 tránsitos en G , con magnitud 19 en las tres bandas, y errores del orden de 0.02 mag en G , 0.20 mag en BP y 0.19 mag en RP ; y la tercera está ubicada a una latitud $b = 69^\circ$, tiene 60 tránsitos en G , con magnitud 14 en las tres bandas, errores del orden de 0.001 mag en G , 0.006 mag en BP y en RP . Con esto observamos que los errores en BP y RP siempre son mayores que en G , que el error en magnitud es grande para estrellas débiles, que mayor número de tránsitos no garantiza mejor error, y que la latitud influye pero más influyente es el brillo: lo ideal es una estrella brillante a alta latitud con una buena cantidad de observaciones.

⁷Éste es un número que identifica unívocamente a cada objeto en el catálogo.

⁸Notación: $\log = \log_{10}$

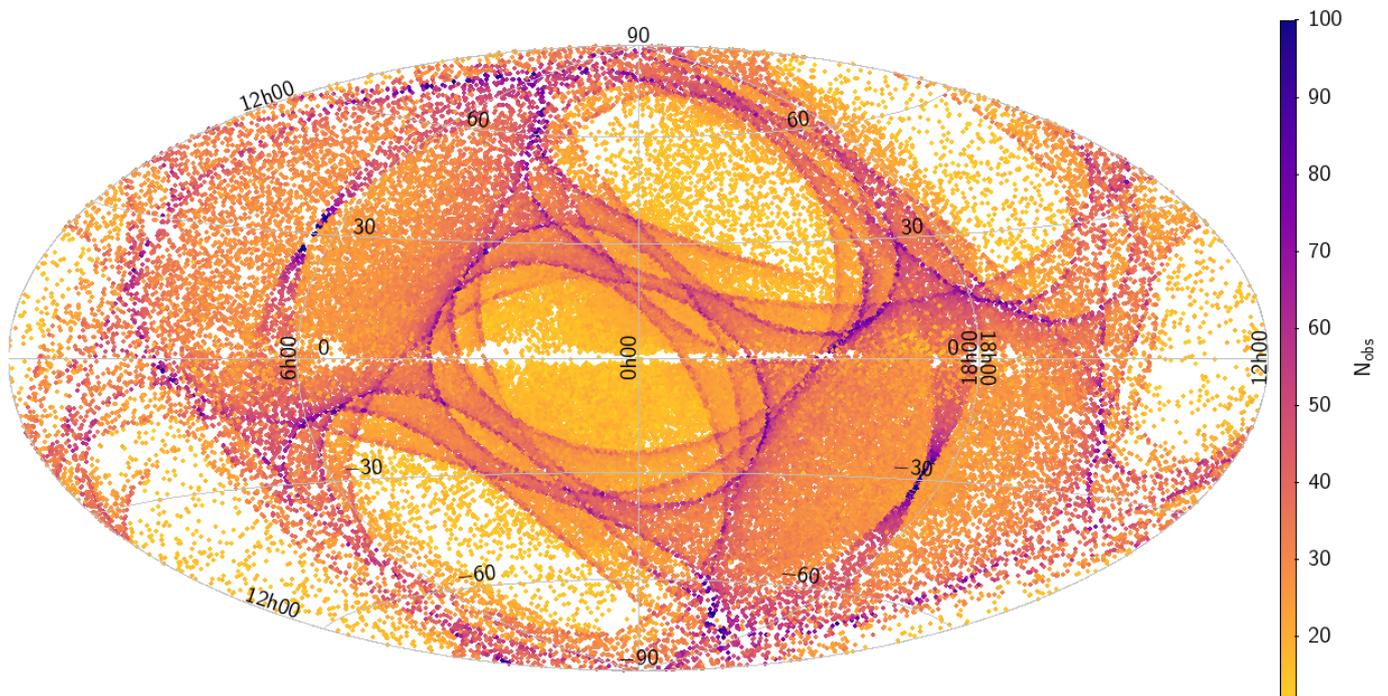


Figura 2.5: Distribución de estrellas RRL en el cielo. Coordenadas galácticas. El color es proporcional al número de observaciones en G.

Una vez que nos familiarizamos con las estrellas del catálogo SOS pasamos a la construcción de las curvas de luz y de color observado. Con estas curvas podremos visualizar la calidad de los datos de la misión.

2.3.1. Curvas de luz y color observado

Las estrellas RR Lyrae tienen curvas de luz características según su tipo de clasificación. Realizamos la identificación visual de las curvas de luz para verificar la utilidad de los datos: si la curva de luz no se ve bien entonces esos datos no van a ser confiables. Facilita la visualización de las observaciones en fase de mínima luz, siendo un parámetro importante para la selección de las calibradoras. A continuación se detalla el proceso de la construcción.

Para cada estrella obtuvimos los datos de fotometría necesarios para la construcción de las curvas de luz, de la tabla EP. Filtramos las medidas rechazadas por el procesamiento de DPAC de fotometría y de variabilidad, y las medidas de flujo negativas (i.e. no físicas) con los flags `rejected_by_photometry` y `rejected_by_variability` (EP). Como la variación del brillo es periódica podemos superponer

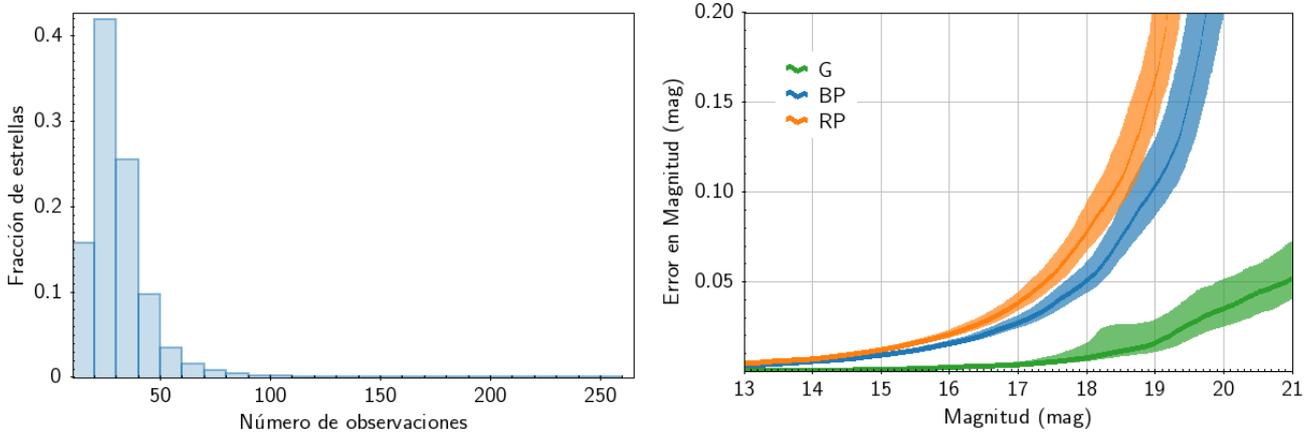


Figura 2.6: Fracción sobre el total de estrellas contra número de observaciones (izquierda). Error en magnitud contra magnitud en las tres bandas de Gaia para 500 estrellas (derecha).

todos los tránsitos en el mismo intervalo. Es decir, graficamos el brillo (la magnitud) en función de la fase ϕ (indica en qué parte del ciclo de pulsación está), que se calcula como:

$$\phi = \frac{1}{P}(t - t_0 - \lfloor t - t_0 \rfloor), \quad (2.2)$$

donde P es el período (`p1` para las RRab y `p1_0` para las RRc, tomado de SOS), t es el tiempo de observación del tránsito⁹ (`time`, EP) t_0 es el tiempo del tránsito en máxima luz (`epoch_g`, SOS), y $\lfloor t - t_0 \rfloor$ es la parte entera de la resta.

Graficamos la magnitud (`mag`, EP) contra la fase ϕ en las tres bandas con sus respectivas barras de error, donde calculamos el error en magnitud con la Ec. 2.1. En cada curva de luz se encuentra especificado el tipo de RR Lyrae (`best_classification`, SOS), el período, y el número de observaciones en cada banda. Dos ejemplos de estrellas RRL brillantes con un gran número de observaciones se encuentran en la Figura 2.8 (arriba): los errores en magnitud son muy pequeños y se aprecia la curva característica de cada tipo. Por el contrario, en la Figura 2.8 (abajo) se encuentran ejemplos de dos estrellas RRL tenues con errores en magnitud relativamente grandes y curvas de luz características no identificables. En las curvas de luz de la Figura 2.7 (derecha), las estrellas con magnitudes altas (i.e. menor brillo) tienen errores grandes en BP y RP en comparación con G por más que cuenten con un gran número de observaciones. Para estas estrellas tenues no se aprecia tan claramente la forma característica de la curva en BP y RP.

La curva de color observado se obtiene simplemente graficando el color observado ($X - Y$) contra la fase ϕ para cada tránsito. ($X - Y$) es la resta de un par dado de bandas de Gaia, obtenidos de la tabla EP

⁹Para G, es el tiempo de observación promedio del tránsito por el CCD; para BP y RP es el tiempo de observación por el CCD de BP.

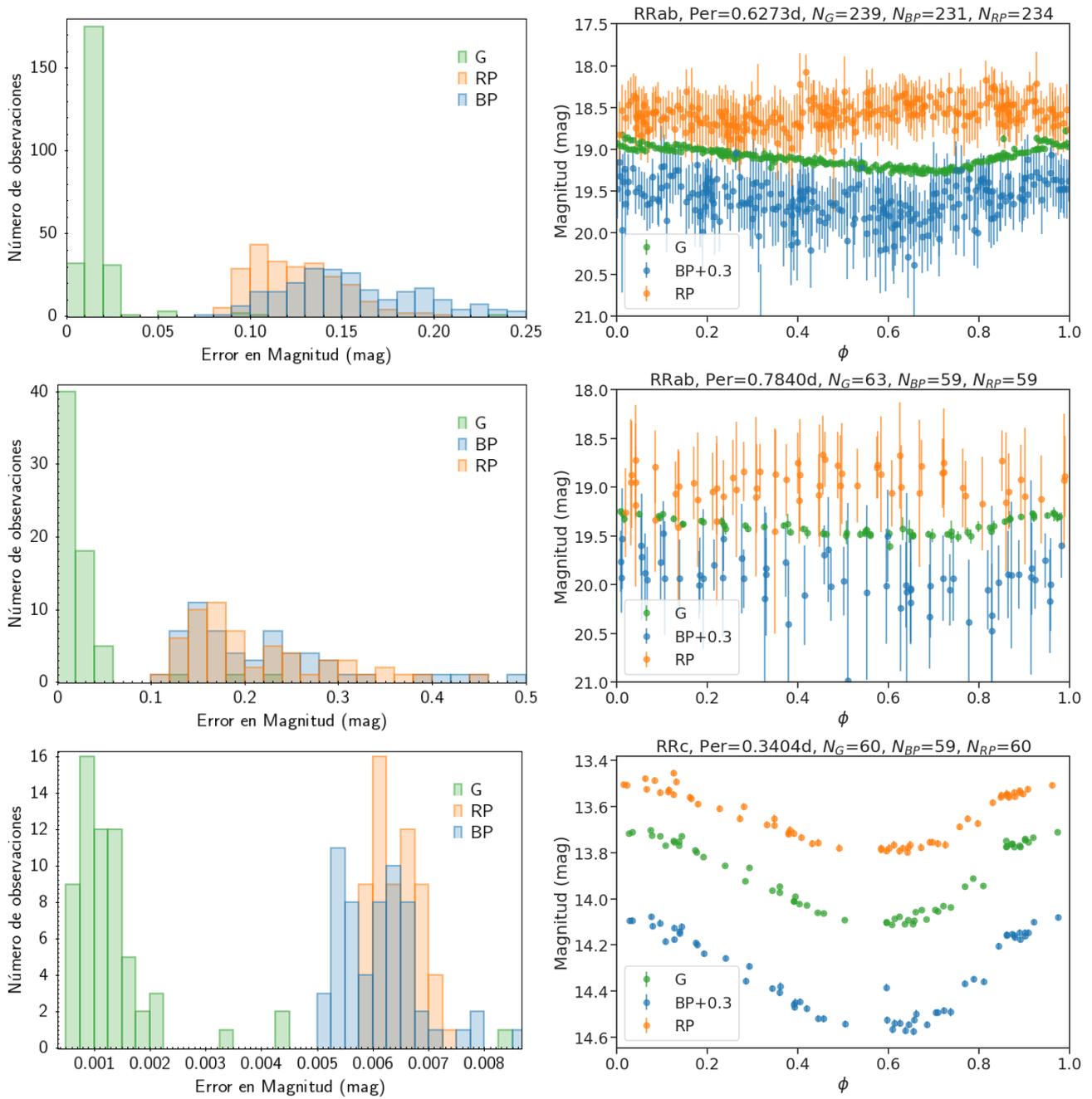


Figura 2.7: Número de observaciones contra error en magnitud aparente en cada banda (izquierda). Curvas de luz (derecha).

para cada tránsito, donde cada observación de Gaia (por AF, BP, RP) está identificada con un `transit_id` si corresponden al mismo tránsito por el plano focal y, por lo tanto, son cuasi-simultáneas. Filtramos las medidas rechazadas por fotometría y variabilidad (`rejected_by_photometry` y `rejected_by_variability`, EP), y las estrellas menos brillantes que magnitud 20.7, siendo este valor la magnitud límite de Gaia.

En el siguiente capítulo detallaremos el proceso de desenrojecimiento para construir las curvas de color intrínseco, que nos permitirán evidenciar el hecho de que los colores intrínsecos de las RRL en la fase de mínima luz son constantes.

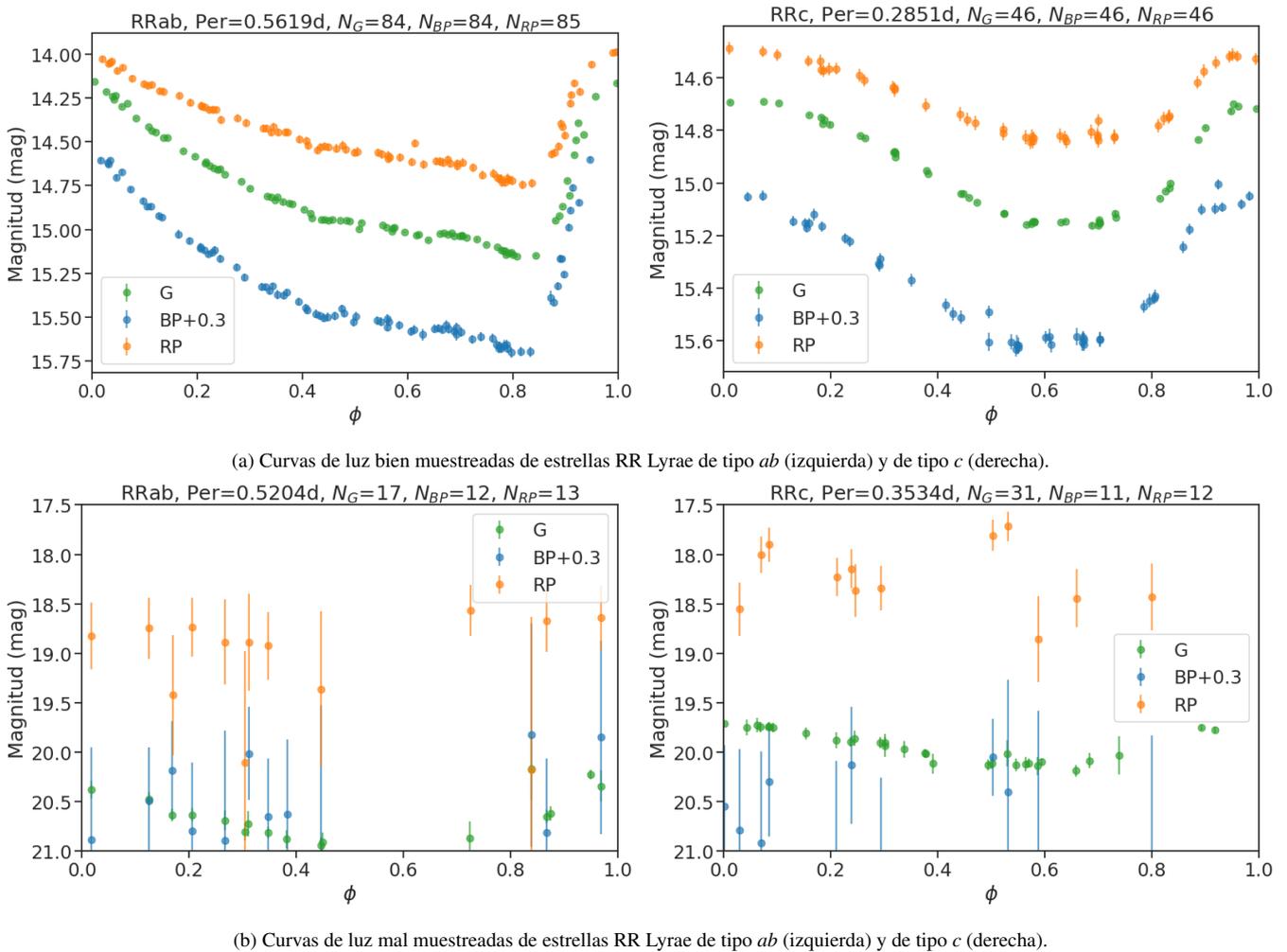


Figura 2.8: Curvas de luz de estrellas RRL. Las curvas en la banda *BP* han sido trasladadas por un factor arbitrario para evitar solapamiento con las de *G* y *RP*.

Capítulo 3

Calibración de colores intrínsecos en mínima luz

Para calibrar los colores intrínsecos de las estrellas RR Lyrae en el sistema fotométrico de Gaia necesitamos un conjunto óptimo de estrellas calibradoras que obtendremos siguiendo los pasos detallados a continuación:

- Desenrojecer a todas las estrellas con el mapa de extinción de [SFD98](#)
- Calcular los colores intrínsecos en fase de mínima luz (rango de fase que definiremos a partir de las curvas de color intrínseco)
- Definir el conjunto preliminar de estrellas calibradoras a alta latitud galáctica para estudiar el comportamiento del color intrínseco como función del período
- Analizar los residuos del ajuste de la relación color-período en función de diferentes parámetros para optimizar el conjunto de estrellas calibradoras
- Refinar el conjunto con los parámetros determinados para minimizar la dispersión de la relación color-período
- Con el conjunto refinado de estrellas calibradoras, reportar la calibración final de los colores intrínsecos y los errores asociados

En las siguientes secciones iremos describiendo cada uno de estos pasos.

3.1. Desenrojecimiento inicial de las estrellas RR Lyrae con SFD98

Schlegel et al. (1998) presentan un mapa de la extinción por polvo en todo el cielo con una resolución espacial de $6'.1$, construido a partir de un mapa de la temperatura del polvo con el mapa IRAS Sky Survey Atlas (ISSA) del satélite IRAS y con los datos de 100 y 240 micras del Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE) del satélite COBE. La temperatura del polvo determina la cantidad de polvo que bloquea la luz estelar, por lo que el mapa de temperatura del polvo se puede convertir en un mapa de densidad columnar de polvo. Esto se convierte al enrojecimiento equivalente, $E(B - V)$, usando una calibración de los colores observados e intrínsecos en $(B - V)$ de galaxias elípticas. La extinción promediada en la línea de visión se deriva del $E(B - V)$ asumiendo una ley de extinción estándar y un coeficiente de absorción total a selectiva, $R_V = A_V / E(B - V)$.

La ley de extinción muestra cuánta luz se absorbe como función de la longitud de onda (Figura 3.1): esta dependencia de la extinción con la longitud de onda hace que el color observado de una estrella sea “más rojo” que el intrínseco (Salaris & Cassisi, 2005). Mientras tanto, R_V depende de la composición química del polvo que causa la extinción. Es una constante cuyo valor típico en la Vía Láctea es 3.1, aunque se ha encontrado que varía sobre algunas líneas de visión.

El mapa de enrojecimiento de SFD98 no describe la estructura detallada como función de la distancia del polvo en el medio interestelar, por lo que se advierte que los resultados no son confiables dentro del Disco Galáctico (donde la extinción es alta y variable) ni hacia las Nubes de Magallanes y otras fuentes extragalácticas, ya que puede ser poco representativo del polvo Galáctico en la línea de visión. Para ilustrarlo, en la Figura 3.2 se representa esquemáticamente la variación del gas y polvo en una línea de visión en el Disco y otra hacia el Halo Galáctico: dentro del Disco, dos estrellas sobre la misma línea de visión pueden tener extinciones diferentes por la presencia de gas y polvo, pero se les asigna el mismo valor con este mapa. Esto no ocurre a altas latitudes galácticas en el Halo, donde no hay gas y polvo: el valor de la extinción promediada sobre la línea de visión no varía mucho con la distancia una vez fuera del Disco.

Si tomamos estrellas calibradoras a alta latitud galáctica podremos desenrojecerlas con certeza utilizando el mapa de SFD98. Calcularemos el desenrojecimiento de todas las estrellas de esta forma, aunque no sea acertado para las que se encuentran en zonas poco confiables, para luego definir los parámetros que optimizarán el conjunto de estrellas que se utilizarán para la calibración. El desenrojecimiento consiste en calcular el color intrínseco de todas las estrellas según la ecuación:

$$(X - Y)_0 = (X - Y) - E(X - Y), \quad (3.1)$$

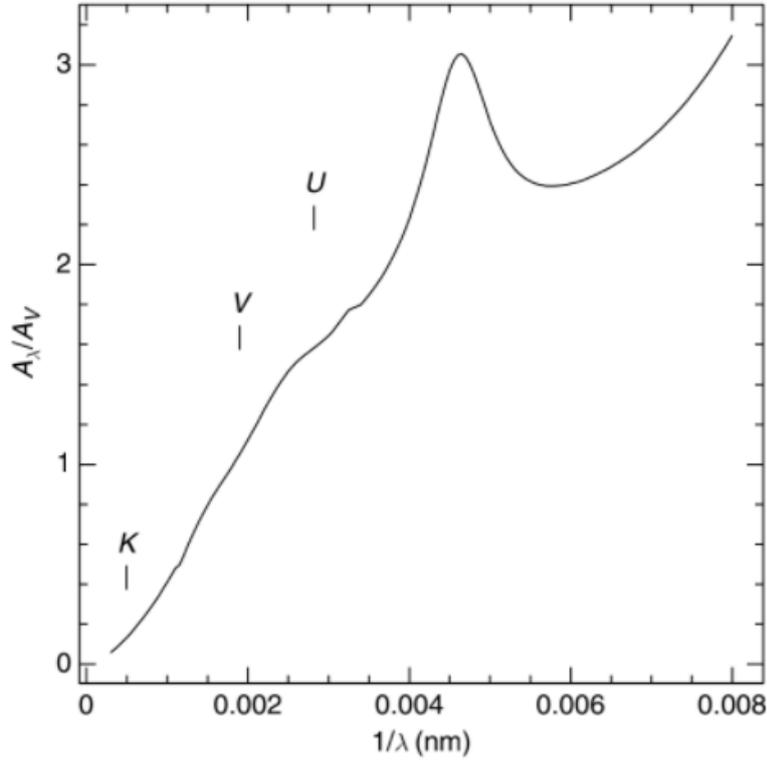


Figura 3.1: Ley de extinción válida para nuestra Galaxia. Tomado de [Salaris & Cassisi \(2005\)](#).

donde $E(X - Y)$ es el exceso de color en un par dado de bandas fotométricas, dado por:

$$E(X - Y) = A_X - A_Y. \quad (3.2)$$

Los coeficientes de extinción se calcularon como:

$$A_X = k_X A_0, \quad (3.3)$$

donde, según [Gaia Collaboration et al. \(2018a\)](#), k_X está dado por:

$$k_X = c_1 + c_2 \overline{(BP - RP)_0} + c_3 \overline{(BP - RP)_0}^2 + c_4 \overline{(BP - RP)_0}^3 + c_5 A_0 + c_6 A_0^2 + c_7 A_0 \overline{(BP - RP)_0}, \quad (3.4)$$

con $A_0 = 3.1E(B - V)$; $\overline{(BP - RP)_0} = 0.7$, el color intrínseco medio de todas las RRL de SOS calculado por [Mateu et al. \(2020\)](#); y los parámetros c_i se resumen en la Tabla 3.1. El exceso de color $E(B - V)$ se obtiene directamente del mapa de [SFD98](#) ingresando las coordenadas l y b (GS) de cada estrella. Esto se hace con la rutina `SFDQuery()` del paquete `dustmaps` de Python.

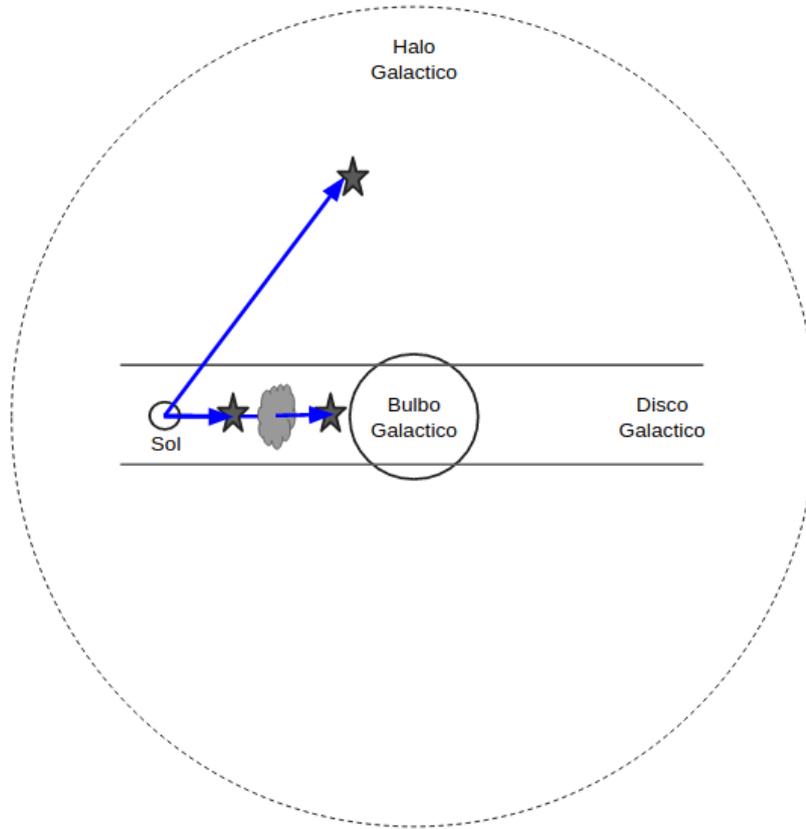


Figura 3.2: Esquema de la extinción sobre una línea de visión.

Así, dado $E(B-V)$ por el mapa de [SFD98](#) en una cierta línea de visión (l, b) , se calculan los coeficientes k_X mediante la Ecuación 3.4 y la extinción en cada una de las bandas de Gaia mediante la Ecuación 3.3. El error en extinción y en exceso de color $E(B-V)$ se estima en 10 % siguiendo las recomendaciones de [SFD98](#).

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
k_G	0.9761	-0.1704	0.0086	0.0011	-0.0438	0.0013	0.0099
k_{BP}	1.1517	-0.0871	-0.0333	0.0173	-0.0230	0.0006	0.0043
k_{RP}	0.6104	-0.0170	-0.0026	-0.0017	-0.0078	0.00005	0.0006

Tabla 3.1: Parámetros usados para el cálculo de coeficientes de extinción de Gaia como función de color y extinción, tomados de [Gaia Collaboration et al. \(2018a\)](#).

3.2. Colores observados e intrínsecos en fase de mínima luz

Las curvas de color intrínseco de las RR Lyrae muestran la propiedad fotométrica que las caracteriza como estándares de color: en la fase de mínima luz todas las estrellas RRL de igual tipo de clasificación tienen el mismo color intrínseco. Para utilizar esta propiedad, definiremos la fase de mínima luz a partir de la construcción de las curvas de color intrínseco. Describiremos el cálculo del color medio en mínima luz que será utilizado para la calibración de los colores intrínsecos.

Para construir las curvas graficamos el color intrínseco (Ec. 3.1) contra la fase (Ec. 2.2) para magnitudes menores a 20.7 mag. Utilizamos los flags `rejected_by_photometry` y `rejected_by_variability` (EP) para filtrar las medidas rechazadas por el procesamiento de fotometría y de variabilidad. En la Figura 3.3 se presentan las curvas de color intrínseco de una estrella RR_{ab} y una RR_c , y en la Figura 3.4 se encuentran las curvas de color intrínseco superpuestas de 30 estrellas calibradoras de cada tipo, que tomamos como representativo del total de calibradoras. Debido a que las RR_c son más calientes que las RR_{ab} , sus colores intrínsecos son más azules (Smith, 1995), además tienen una dispersión mayor en color.

En las Figuras 3.3 y 3.4 hay tres rangos de fase de mínima luz indicados: $\phi \in [0.4, 0.7]$ (en gris), $\phi \in [0.5, 0.8]$ y $\phi = 0.65$. La primera es la que definimos en este trabajo a partir de las curvas de color superpuestas: es en esta fase que se aprecia mejor el comportamiento constante del color intrínseco; el segundo rango es el que se encuentra típicamente en los antecedentes (Sturch, 1966; Blanco, 1992; Guldenschuh et al., 2005; Kunder et al., 2010): se ha utilizado en la calibración de colores intrínsecos de estrellas RRL de tipo ab , pero no de tipo c ; y el tercero es una definición puntual de fase que se utilizó en el trabajo de Vivas et al. (2017) para la calibración de colores intrínsecos de estrellas RR_{ab} y RR_c , utilizando un ajuste de plantillas con los coeficientes de Fourier. Este tipo de ajuste es ideal cuando se tiene una muestra pequeña de observaciones en la fase típica de mínima luz. Con los coeficientes de descomposición de Fourier de Gaia SOS se podría hacer un ajuste para obtener una calibración de ese tipo, eligiendo la fase puntual de mínima luz como $\phi = 0.55$ (o haciendo un análisis estadístico más sofisticado para encontrar la fase más adecuada). Los tres rangos son válidos pero el que tiene mejor desempeño en las bandas de Gaia es el primero, ya que cualitativamente se aprecia que la curva de color es constante para las RR_{ab} en el rango $\phi \in [0.4, 0.7]$ y empieza a subir en $\phi \in [0.7, 0.8]$, mientras que para las RR_c la curva tiene un mínimo aproximadamente en la mitad del rango, en $\phi = 0.55$ (ver Figura 3.4); cuantitativamente se obtienen residuos menores del ajuste color-período. Por simplicidad consideramos el mismo rango para las RR_{ab} y las RR_c , pero se podrían estudiar los residuos del ajuste con diferentes rangos de mínima luz para los dos tipos de RRL, como por ejemplo: $[0.5, 0.8]$ para las RR_{ab} y $[0.4, 0.7]$ para las RR_c .

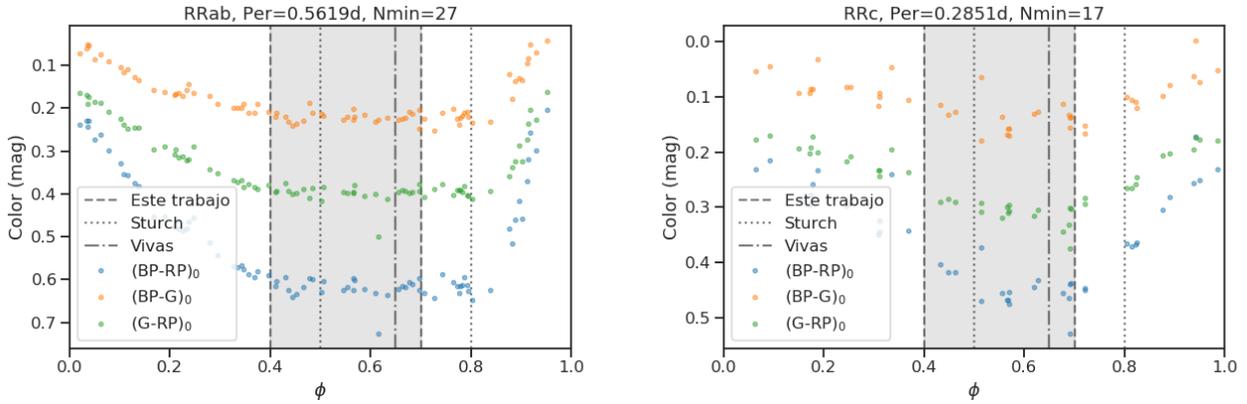


Figura 3.3: Curvas de color intrínseco de RR Lyrae tipo *ab* (izquierda) y de tipo *c* (derecha).

Si miramos la fase de mínima luz en la curva de luz de la Figura 2.8 podemos observar que el rango en el que el brillo efectivamente es mínimo para la *RRab* no coincide exactamente con el rango en el que el color intrínseco es constante; más bien, el rango de fase previo (i.e. $\phi \in [0.4, 0.7]$) al mínimo brillo (i.e. $\phi = 0.8$) es la fase en la que el color es constante. Es decir, lo importante es que en el rango de fase que elegimos, la llamada fase de “mínima luz”, se cumpla que el color intrínseco es constante, y no que efectivamente sea cuando tiene mínimo brillo. Así, calculamos el color observado e intrínseco para cada par de bandas de Gaia, $(X - Y)_{min}$ y $(X - Y)_{0,min}$, como la mediana de los colores en la fase $\phi \in [0.4, 0.7]$. Para calcular la mediana del color requerimos que haya al menos tres medidas de color en este rango.

En la siguiente sección graficaremos el color intrínseco en función del período para un conjunto preliminar de estrellas calibradoras que modificaremos en base a los residuos del ajuste de color-período obtenido. Una vez determinado el conjunto óptimo de estrellas calibradoras obtendremos la relación de color-período final, i.e. la calibración de los colores intrínsecos en mínima luz. A partir de esta relación y el período dado por SOS podremos calcular el color intrínseco de todas las estrellas del catálogo. Con el color observado en la fase de mínima luz y el color intrínseco obtenido de la relación color-período obtendremos el exceso de color en cada par de bandas de Gaia.

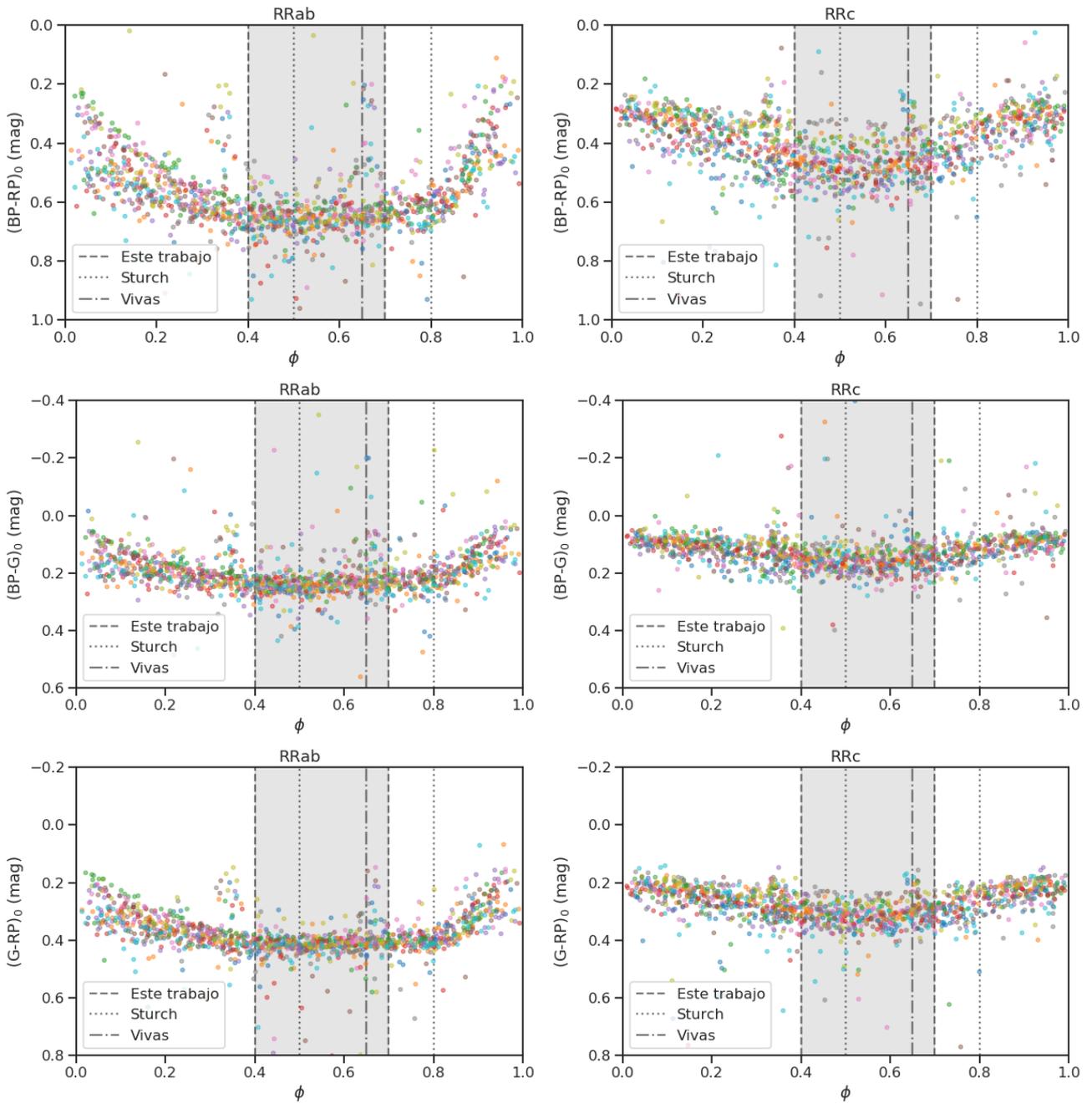


Figura 3.4: Curvas de color intrínseco en los tres colores de Gaia de 30 estrellas RR Lyrae de tipo *ab* (izquierda) y de tipo *c* (derecha).

3.3. Análisis de los residuos del conjunto preliminar de estrellas calibradoras

Para definir el conjunto óptimo de estrellas calibradoras, primero necesitamos analizar los residuos del ajuste obtenido con el conjunto preliminar de estrellas calibradoras como función de otros parámetros, e.g. la latitud, la magnitud y el número de observaciones.

Utilizamos el flag `phot_bp_rp_excess_factor` (GS) para remover las medidas con errores sistemáticos en la fotometría BP y RP . Este flag mide el exceso de flujo en BP y RP con respecto a la banda G . Al superponerse ligeramente las bandas BP y RP se espera que la suma de los flujos en estas bandas supere el flujo en G por un pequeño factor. Sin embargo, el exceso de flujo puede ser alto por efectos de crowding, sistemas binarios, modelado de fondo incompleto u otros factores. Según [Evans et al. \(2018\)](#) se puede filtrar con la condición: $C < a + b(BP - RP)^2$, donde a y b se eligen según las características de la muestra en estudio; en nuestro trabajo elegimos $a = 1.5$ y $b = 0$, recomendado para estrellas RRL por [Mateu et al. \(2020\)](#). Una vez removidas las medidas con fotometría contaminada graficamos la mediana del color intrínseco en fase de mínima luz $(X - Y)_{0,min}$ contra $\log(Per/d)$ del conjunto preliminar de 94 832 estrellas. Ajustamos la relación color-período preliminar con un polinomio de segundo orden, obteniendo los residuos R y la desviación estándar de los residuos σ_R (~ 1.06). Como se puede observar en la Figura 3.5a, los puntos se dispersan mucho del ajuste, dejando clara la necesidad de refinar el conjunto de estrellas calibradoras para reducir el error en color intrínseco.

En la Figura 3.5b se muestra la dispersión de los residuos σ_R de la relación color-período preliminar contra la latitud $|b|$, separando los hemisferios ($b < 0^\circ$ y $b > 0^\circ$). Se muestra únicamente esta gráfica para el color $(BP - RP)_{0,min}$ ya que para los demás colores el comportamiento es prácticamente idéntico. La principal diferencia se encuentra en el valor de la dispersión, el cual es mayor para $(BP - RP)_{0,min}$ que para los demás colores. Esto ocurre por más que BP y RP sean independientes (no se superponen mientras que BP y G , G y RP sí) ya que la banda G está mejor muestreada y $(BP - RP)$ depende más fuertemente de la temperatura¹. Para $b < 0^\circ$ la dispersión es mayor por la presencia de las Nubes de Magallanes: hay picos en dispersión en $|b| = 30^\circ$ y $|b| = 45^\circ$. Por este motivo, se eliminaron las estrellas de las Nubes de Magallanes del conjunto final de estrellas calibradoras (y del mapa de extinción final, Figura 4.3). También eliminamos a las estrellas de los cúmulos M3 y Sculptor, ya que generan picos en las gráficas de los residuos contra la latitud, probablemente debido a contaminación fotométrica en las zonas más densas de ambos sistemas. La tendencia general es que disminuye la dispersión con la latitud, con un mínimo en

¹Notas del curso de Astronomía Galáctica y Extragaláctica

$|b| \sim 50^\circ$. En el hemisferio sur, a partir de esta latitud la dispersión vuelve a aumentar, posiblemente por el hecho de que hay pocas estrellas de este conjunto a tan altas latitudes ($< 7\%$). Para $b > 0^\circ$ la dispersión decrece monótonamente, habiendo un plateau entre $40^\circ < b < 80^\circ$. Esto implica que un corte en $|b| > 50^\circ$ para las estrellas calibradoras es bastante razonable.

Con el corte en $C < 1.5$ y $|b| > 50^\circ$, en la Figura 3.5c graficamos R (residuos obtenidos para $(BP - RP)_{0,min}$, puntos anaranjados) y la mediana de R con su desviación estándar σ_R (línea y relleno azul) como función de la magnitud promediada en flujo m_G . La dispersión aumenta considerablemente a partir de $m_G = 18$, lo cual coincide con el aumento en el error en magnitud que graficamos en la Figura 2.6, por lo que dejaremos solo las estrellas más brillantes que este valor (también se evaluó un corte en $m_G = 16$ pero no mejora considerablemente y reduce significativamente el número de estrellas calibradoras). Esto ocurre porque es la magnitud para la cual se disparan los errores fotométricos en Gaia DR2, aproximándose a la magnitud límite de $G = 20.7$. Al igual que en la figura anterior, mostramos solamente la banda G como indicadora ya que es la banda mejor muestreada de las tres bandas de Gaia y porque las demás bandas dan resultados gráficos similares.

Con los mismos filtros, en la Figura 3.5d graficamos σ_R para cada color contra el número mínimo de observaciones en la fase de mínima luz N_{min} . La dispersión disminuye hasta aproximadamente $N_{min} = 10$. Aumenta la dispersión hasta $N_{min} = 30$, donde disminuye drásticamente por efectos estocásticos, i.e, porque hay pocas estrellas con más 30 observaciones en la fase de mínima luz. Esto ocurre porque la máxima cantidad de observaciones que tiene una RRL en el sondeo de Gaia es 254, el mínimo es 12, y la mediana es 28; de hecho tan solo 689 RRL tienen más de 100 observaciones. Por lo tanto, es demasiado exigente pedir como mínimo 30 observaciones en fase de mínima luz. Dicho esto, para las calibradoras haremos un corte en $N_{min} > 10$.

3.4. Relación color-período del conjunto final de estrellas calibradoras

A partir del análisis de los residuos determinamos que los parámetros que optimizan el conjunto de estrellas son: $|b| > 50^\circ$, $m_G < 18$, y $N_{min} > 10$. Con estos filtros, nuevamente graficamos la mediana del color intrínseco en la fase de mínima luz contra el logaritmo del período. Realizamos un σ -clipping para eliminar los puntos desviados $> 5\sigma_R$ del ajuste, obteniendo así el conjunto final de estrellas calibradoras.

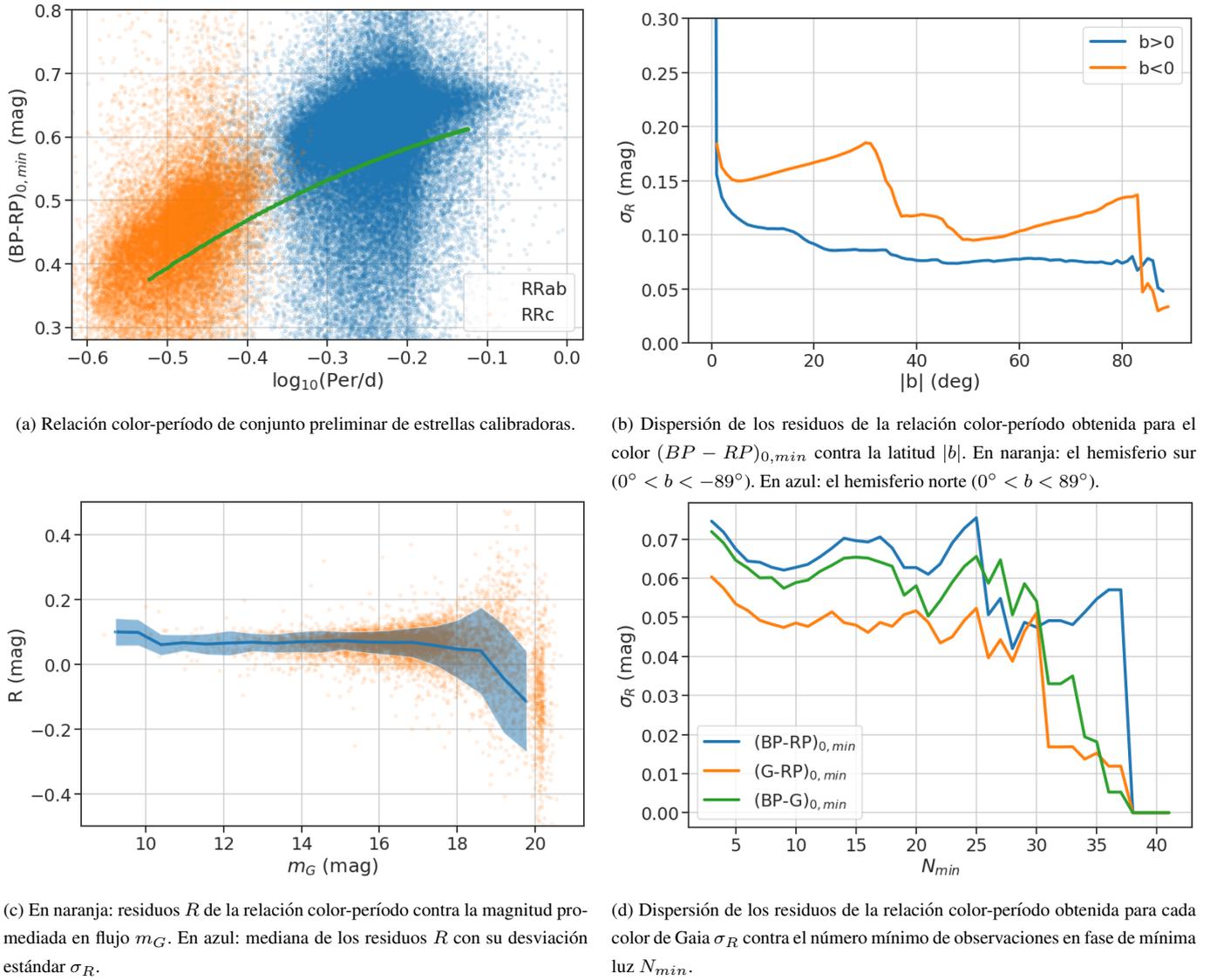


Figura 3.5: Análisis de los residuos del conjunto preliminar de estrellas calibradoras en diferentes variables.

La relación color-período final con el ajuste de la Figura 3.6, está dada por:

$$(X - Y)_{0,min} = x_0 + x_1 * \log(\text{Per}/d) + x_2 * (\log(\text{Per}/d))^2, \quad (3.5)$$

donde los coeficientes x_i del ajuste por mínimos cuadrados del polinomio de segundo orden se reportan en la Tabla 3.2. Tomaremos como medida del error del ajuste la dispersión σ_R de los residuos, al ser ésta mucho mayor que los errores individuales de los coeficientes de la relación color-período obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados, y ya que caracteriza apropiadamente la dispersión intrínseca observada en la relación color-período. El conjunto final de estrellas calibradoras comprende de 1776 RRab y 596 RRc, i.e. un total de 2372 estrellas (que indicaremos con `flag_calibradora = 1` en la Tabla 4.2). A partir de esta relación y el período dado por SOS podremos hacer la calibración de los colores intrínsecos de todas

R	x_0	x_1	x_2	σ_R
$(BP - RP)_{0,min}$	0.661	-0.193	-1.252	0.031
$(BP - G)_{0,min}$	0.249	-0.011	-0.442	0.021
$(G - RP)_{0,min}$	0.413	-0.153	-0.768	0.019

 Tabla 3.2: Coeficientes x_i del ajuste parabólico de la relación color-período (Ec. 3.5) y desviación estándar de los residuos σ_R .

rms($X - Y$)	$(u - g)$	$(g - r)$	$(g - i)$	$(r - i)$	$(i - z)$	$(r - z)$
RRab	0.029	0.022	0.026	0.012	0.016	0.016
RRc	0.026	0.023	0.023	0.017	0.014	0.015

 Tabla 3.3: Valores rms del ajuste parabólico y del ajuste lineal de la relación color-período para las 47 estrellas RRab y las 14 RRc, respectivamente, para los colores $ugriz$ de DECam (Vivas et al., 2017).

las estrellas del catálogo.

3.4.1. Comparación con trabajos anteriores

Podemos comparar el error en los colores intrínsecos, i.e. la desviación estándar de los residuos que obtuvimos del ajuste parabólico de la relación color-período para los colores intrínsecos de Gaia, con los valores rms de los ajustes obtenidos en trabajos previos.

En el trabajo de Guldenschuh et al. (2005) se obtuvo la calibración del color intrínseco medio en mínima luz $\overline{(V - I)_{0,min}}$ con 16 estrellas RRab, y un rms igual a 0.024. En el trabajo de Vivas et al. (2017) se obtuvo una relación color-período diferente para cada tipo de RRL: con las 47 RRab se obtuvo un ajuste parabólico y con las 14 RRc un ajuste lineal de la relación color-período. Los valores rms de cada ajuste para los colores $ugriz$ de DECam se encuentran en la Tabla 3.3. Mientras tanto, en nuestro trabajo obtuvimos valores de dispersión de los residuos del ajuste parabólico de la relación color-período para los colores $(BP - RP)_{0,min}$, $(BP - G)_{0,min}$, $(G - RP)_{0,min}$ iguales a: 0.031, 0.021, 0.019, respectivamente. Los valores rms de Vivas et al. (2017) son más chicos para los colores más rojos del sistema fotométrico que utilizaron, riz , y similares a los obtenidos en este trabajo para los colores más azules $ugri$. El color $(G - RP)_{0,min}$ parecería ser el mejor candidato a color estándar al tener la menor dispersión, sin embargo, para decidir cuál es el color que tiene mejor desempeño como color estándar debemos comparar la dispersión resultante en extinción en una única banda.

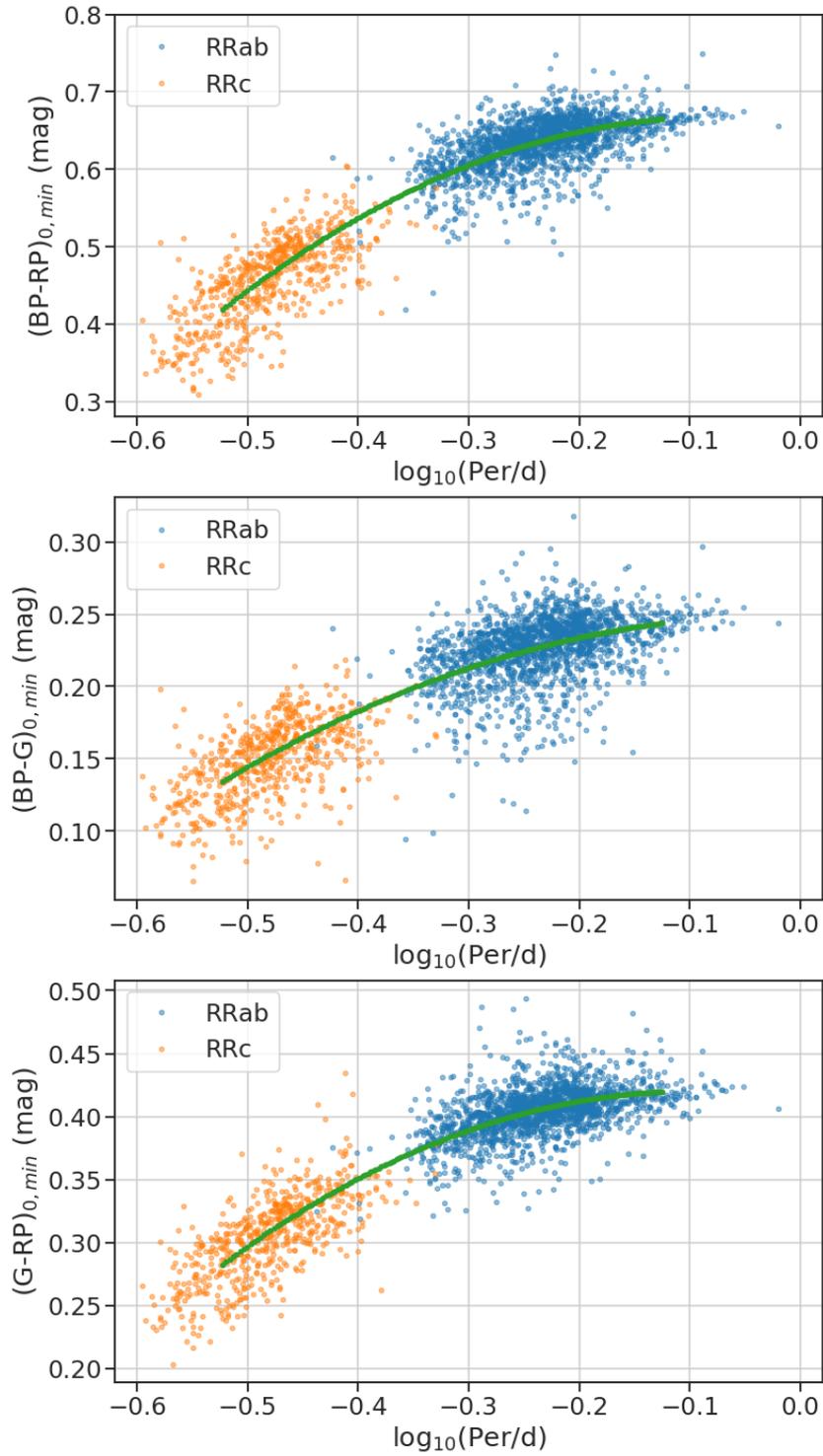


Figura 3.6: Relación color-período del conjunto final estrellas calibradoras. En azul: 1776 RRab. En naranja: 596 RRc. En verde: ajuste polinómico de segundo orden.

Capítulo 4

Extinciones y distancias

Ahora que tenemos la calibración de los colores intrínsecos en mínima luz obtenida con las estrellas calibradoras podemos pasar a calcular el exceso de color en cada par de bandas de Gaia, la extinción y la distancia a cada estrella del sondeo, con sus respectivos errores. Construiremos mapas de extinción para estudiar su dependencia con la distancia, y los compararemos con el mapa de extinción de [SFD98](#).

El exceso de color $E(X - Y)$ en un par dado de bandas de Gaia se obtuvo como la resta entre el color observado en mínima luz $(X - Y)_{min}$, tomado como la mediana de los colores observados en el rango de fase $\phi \in [0.4, 0.7]$, y el color intrínseco, calculado a partir del ajuste dado por la Ec. 3.5 y los coeficientes de la Tabla 3.2. Esto es:

$$E(X - Y) = (X - Y)_{min} - (X - Y)_{0,min}. \quad (4.1)$$

El error en el exceso de color obtenido del ajuste se calculó como la raíz cuadrada de la suma cuadrática del error en el color observado en fase de mínima luz y el error en el color intrínseco obtenido del ajuste:

$$err(E(X - Y)) = \sqrt{err^2(X - Y)_{min} + err^2(X - Y)_{0,min}},$$

donde el error en el color observado en la fase de mínima luz es la mediana del error en el color observado en la fase de mínima luz, i.e. la raíz cuadrada de la suma cuadrática del error en magnitud para cada par de bandas en la fase de mínima luz:

$$err(X - Y)_{min} = \sqrt{err^2 X + err^2 Y}_{min},$$

y tomamos el error en el color intrínseco como la dispersión del ajuste σ_R de la Tabla 3.2. El error en magnitud se calculó con la Ec. 2.1.

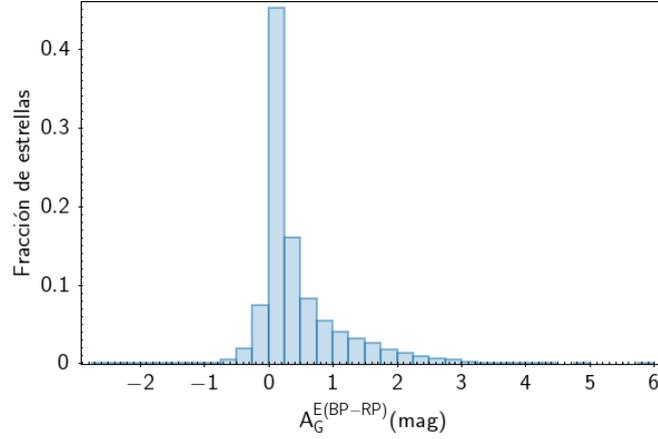


Figura 4.1: Fracción sobre el total de estrellas contra extinción.

Ya que el exceso de color y la extinción dependen de la mediana de los colores (lo que implica un mínimo de 3 observaciones), usamos como criterio arbitrario de confiabilidad el filtro en el número mínimo de observaciones en fase de mínima luz, $N_{min} \geq 5$ (que indicaremos con `flag_num_min = 1` en la Tabla 4.2).

La extinción calculada a partir del exceso de color $E(X - Y)$ en un par de bandas de Gaia se obtuvo como:

$$A_G^{E(X-Y)} = \frac{k_G}{k_X - k_Y} E(X - Y), \quad (4.2)$$

donde k_X , k_Y y k_G son los coeficientes calculados con la Ec. 3.4. En cuanto a las 2372 calibradoras, 17.37 % de los valores de $A_G^{E(BP-RP)}$, 25.37 % de los valores de $A_G^{E(BP-G)}$, y 19.68 % de los valores de $A_G^{E(G-RP)}$ dieron negativos. Estos valores aparecen por errores estadísticos en los casos en que la extinción es más pequeña o comparable con el error y muy próxima a cero. Con una inferencia estadística más sofisticada se podría evitar este problema. Es lógico que las calibradoras tengan un alto porcentaje de extinción negativa porque fueron seleccionadas preferentemente en zonas de baja extinción. Los valores negativos de $A_G^{E(X-Y)}$ se mantienen reportados en la tabla para las estrellas que cumplen con el número mínimo de observaciones en fase de mínima luz, y sin fotometría contaminada porque, aunque carecen de sentido físico, es lo estadísticamente correcto para evitar sesgos en la distancia. En la Figura 4.1 se presenta la distribución de los valores de la extinción.

El error en la extinción obtenida del ajuste se calculó como:

$$err \left(A_G^{E(X-Y)} \right) = \frac{k_G}{k_X - k_Y} err \left(E(X - Y) \right), \quad (4.3)$$

de donde obtuvimos la mediana del error para las estrellas calibradoras: $err \left(A_G^{E(BP-RP)} \right) = 0.084$ mag,

$err(A_G^{(X-Y)_0})$	$(V-I)$	$(u-g)$	$(g-r)$	$(g-i)$	$(r-i)$	$(i-z)$	$(r-z)$	$(BP-RP)$	$(BP-G)$	$(G-RP)$
RRab	0.055	0.099	0.036	0.066	0.056	0.045	0.112	0.055	0.083	0.063
RRc	-	0.089	0.038	0.058	0.079	0.039	0.105	0.055	0.083	0.063

Tabla 4.1: Error en extinción debido al error en color intrínseco para los colores VI de CTIO (Guldenschuh et al., 2005), $ugriz$ de DECam (Vivas et al., 2017) y G, BP, RP de Gaia.

$err(A_G^{E(BP-G)}) = 0.126$ mag, $err(A_G^{E(G-RP)}) = 0.105$ mag. El error en extinción más pequeño determina el color con mejor desempeño en el cálculo de extinciones. En este caso es $A_G^{E(BP-RP)}$, por lo que $(BP-RP)_{0,min}$ queda elegido como color estándar y es el que emplearemos para calcular la extinción y la distancia a cada estrella. El error en extinción debido únicamente al error en color intrínseco (tomando $err(E(X-Y)) = err(X-Y)_{0,min}$ en la Ec. 4.3) para las estrellas calibradoras se encuentra en la Tabla 4.1 para los colores VI de CTIO (Guldenschuh et al., 2005), $ugriz$ de DECam (Vivas et al., 2017) y G, BP, RP de Gaia. El error que obtuvimos en extinción A_G de $(BP-RP)$, siendo éste el color de Gaia con mejor desempeño, es similar al que se obtiene de las calibraciones de $(V-I)$ y $(r-i)$ para las RRab y de $(g-i)$ para las RRc. Los colores con mejor desempeño de toda la tabla son $(i-z)$ y $(g-r)$.

Finalmente, calculamos la distancia para todas las estrellas con la ecuación de Pogson (1856):

$$d[pc] = 10^{(m_G - M_G - A_G^{E(BP-RP)})/5+1}, \quad (4.4)$$

donde m_G es la magnitud aparente G promediada en flujo (`int_average_g`, SOS), $A_G^{E(BP-RP)}$ está dada por la Ec. 4.2, y M_G es la magnitud absoluta en G dado por Muraveva et al. (2018a):

$$M_G = (0.32 \pm 0.04)[Fe/H] + (1.11 \pm 0.06), \quad (4.5)$$

donde $[Fe/H]$ es un estimado fotométrico de la metalicidad (`metallicity`, SOS) dado para 64 932 estrellas. Para las estrellas restantes que no cuentan con este estimado asumimos $[Fe/H] = (-1.61 \pm 0.02)$ dex, el promedio de la metalicidad obtenido para estrellas RRL de SOS, tomado de Ramos et al. (2020).

El error en distancia se calculó mediante propagación de errores en la Ec. 4.4, según la ecuación:

$$\delta d[pc] = 0.2d \ln 10 \sqrt{(\delta \mu^2 + \delta A_G^2)}, \quad (4.6)$$

donde $\delta \mu^2 = \delta m_G^2 + \delta M_G^2$, con $\delta m_G = \text{int_average_g_error}$ (SOS) y δM_G se obtiene propagando los errores de la Ec. 4.5, obteniendo:

$$\delta M_G^2 = (0.32\delta[Fe/H])^2 + (0.04[Fe/H])^2 + (0.06)^2$$

Igualmente, tomamos $\delta[Fe/H] = \text{metallicity_error}$ (SOS) y para las que no tienen un estimado en SOS, suponemos $\delta[Fe/H] = 0.3$ dex, que es la dispersión típica de la distribución de metalicidad

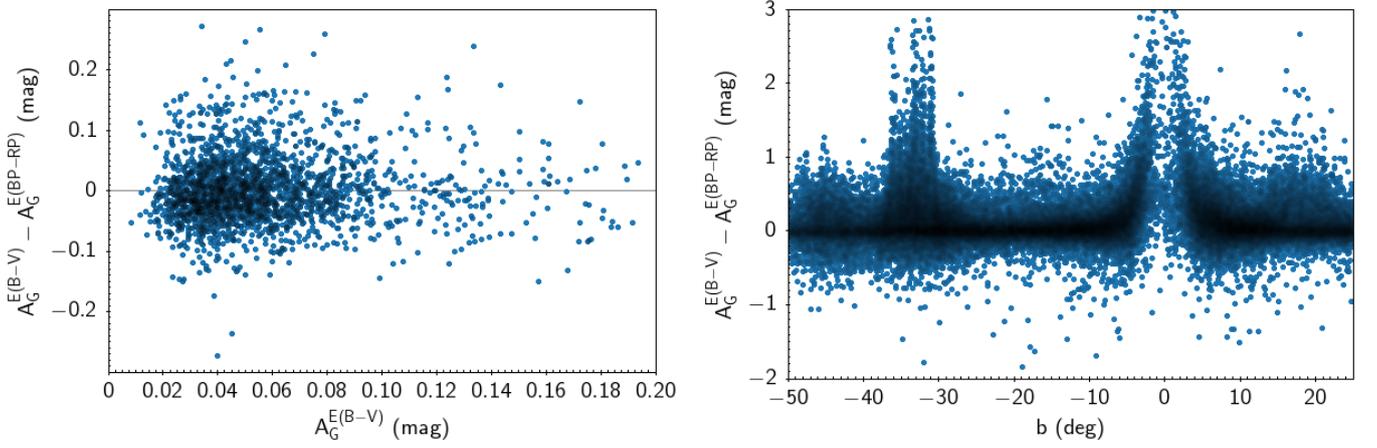
de las estrellas del Halo (Ramos et al., 2020). Finalmente, δA_G es el error en extinción y d la distancia, calculados en las Ecuaciones 4.3 y 4.4, respectivamente. Todos estos resultados se encuentran reportados en la Tabla 4.2.

4.1. Las extinciones de estrellas RR Lyrae en la Galaxia y en las Nubes de Magallanes

Una vez obtenida la extinción de Gaia a cada estrella podemos compararla con la extinción del mapa de SFD98. Veremos cómo se comporta la diferencia entre las dos extinciones como función de la extinción de SFD98 y como función de la latitud; graficaremos la extinción como función de las coordenadas galácticas; y compararemos las distancias de Gaia con las de SFD98, en función de la extinción, contra la ascensión recta de las estrellas en el disco Galáctico y en las Nubes de Magallanes.

En la Figura 4.2a graficamos $A_G^{E(B-V)} - A_G^{E(BP-RP)}$ contra $A_G^{E(B-V)}$, la extinción de SFD98, de las estrellas calibradoras (las extinciones a partir de los otros dos colores dan relaciones muy similares), en donde se observa que la resta de extinciones sigue una recta centrada en cero. Este resultado confirma que la extinción que calculamos no está sesgada como función de la extinción de SFD98. En la Figura 4.2b graficamos $A_G^{E(B-V)} - A_G^{E(BP-RP)}$ contra la latitud galáctica b . Filtramos las extinciones no confiables y las medidas con errores sistemáticos en la fotometría BP y RP con los filtros `flag_num_min = 1` y `phot_bp_rp_excess_factor < 1.5`, respectivamente. Definimos un indicador en la Tabla 4.2 que comprende el cumplimiento de estas condiciones: `flag_confiabilidad = 1`. Se observa que la extinción $A_G^{E(B-V)}$ de SFD98 es mayor que $A_G^{E(BP-RP)}$, la obtenida a través de los colores intrínsecos, en las latitudes correspondientes a las Nubes de Magallanes ($-50^\circ < b < -25^\circ$) y a baja latitud; en las demás latitudes el comportamiento es plano. Este resultado confirma que el mapa de extinción de SFD98 *sobrestima* la extinción en el Disco –a baja latitud galáctica– y en las Nubes de Magallanes. Como era de esperar, a alta latitud galáctica, fuera de las zonas en las que la extinción cambia apreciablemente con la distancia, ambos estimados de la extinción coinciden.

Presentamos el mapa de extinción $A_G^{E(BP-RP)}$ (arriba) y $A_G^{E(B-V)}$ (abajo) en la Figura 4.3, filtrando las extinciones no confiables y las medidas con errores sistemáticos en la fotometría BP y RP , con `flag_confiabilidad = 1`. El mapa consiste en una proyección de Aitoff en coordenadas galácticas con una escala de colores proporcional a la mediana de la extinción $A_G^{E(BP-RP)}$, inferida a partir del color $(BP - RP)_{0,min}$, y a la mediana de la extinción $A_G^{E(B-V)}$, respectivamente. En las zonas donde no se utilizaron las calibradoras, es decir, $|b| < 50^\circ$, se logra recuperar los filamentos que se ven en el mapa de



(a) Extinción de SFD98 menos extinción de Gaia contra extinción de SFD98 de estrellas calibradoras.

(b) Extinción de SFD98 menos extinción de Gaia contra latitud galáctica. La desviación observada en el gráfico hacia $A_G^{E(B-V)} - A_G^{E(BP-RP)}$ positivos en $(-50^\circ < b < -25^\circ)$ es debida a las Nubes de Magallanes, y a $|b| < 10^\circ$, es debida al disco Galáctico.

Figura 4.2: Resta de la extinción de SFD98 y de Gaia como función de la extinción de SFD98, y de la latitud galáctica.

SFD98. Al filtrar los datos con fotometría contaminada desaparece el centro de la LMC de nuestro mapa. A grandes rasgos los mapas son muy similares, pero como veremos a continuación las diferencias son claras en el plano Galáctico a $|z| < 1$ kpc, y en las Nubes de Magallanes.

Para visualizar la extinción en el disco Galáctico hicimos un cambio de coordenadas galácticas esféricas (l, b, d) a cartesianas (x, y, z) :

$$x = d \cos(l) \sin(90^\circ - b)$$

$$y = d \sin(l) \sin(90^\circ - b)$$

$$z = d \cos(90^\circ - b),$$

con las distancias obtenidas usando las extinciones de SFD98 y de este trabajo (a la que nos referiremos como distancia d de Gaia). Se calculó d_{SFD98} con la Ecuación 4.4, cambiando el exceso de color $E(BP - RP)$ por $E(B - V)$.

En la Figura 4.4 se presenta la extinción de estrellas en el disco Galáctico con valores de $|z| < 1$ kpc. En la Figura 4.4a graficamos la distancia heliocéntrica de SFD98 d_{SFD98} contra la ascensión recta AR de las estrellas a menos de 20 kpc como función de la extinción $A_G^{E(B-V)}$. De igual manera, en la Figura 4.4b graficamos la distancia de Gaia d contra la AR como función de la extinción $A_G^{E(BP-RP)}$. En las Figuras 4.4c y 4.4d graficamos el plano xy con una escala de color en función de la extinción $A_G^{E(B-V)}$ y $A_G^{E(BP-RP)}$, respectivamente. Podemos observar cómo se sobrestima el valor de la extinción de SFD98 para una gran cantidad de estrellas sobre algunas líneas de visión de AR y, por consecuencia, se subestima la distancia de

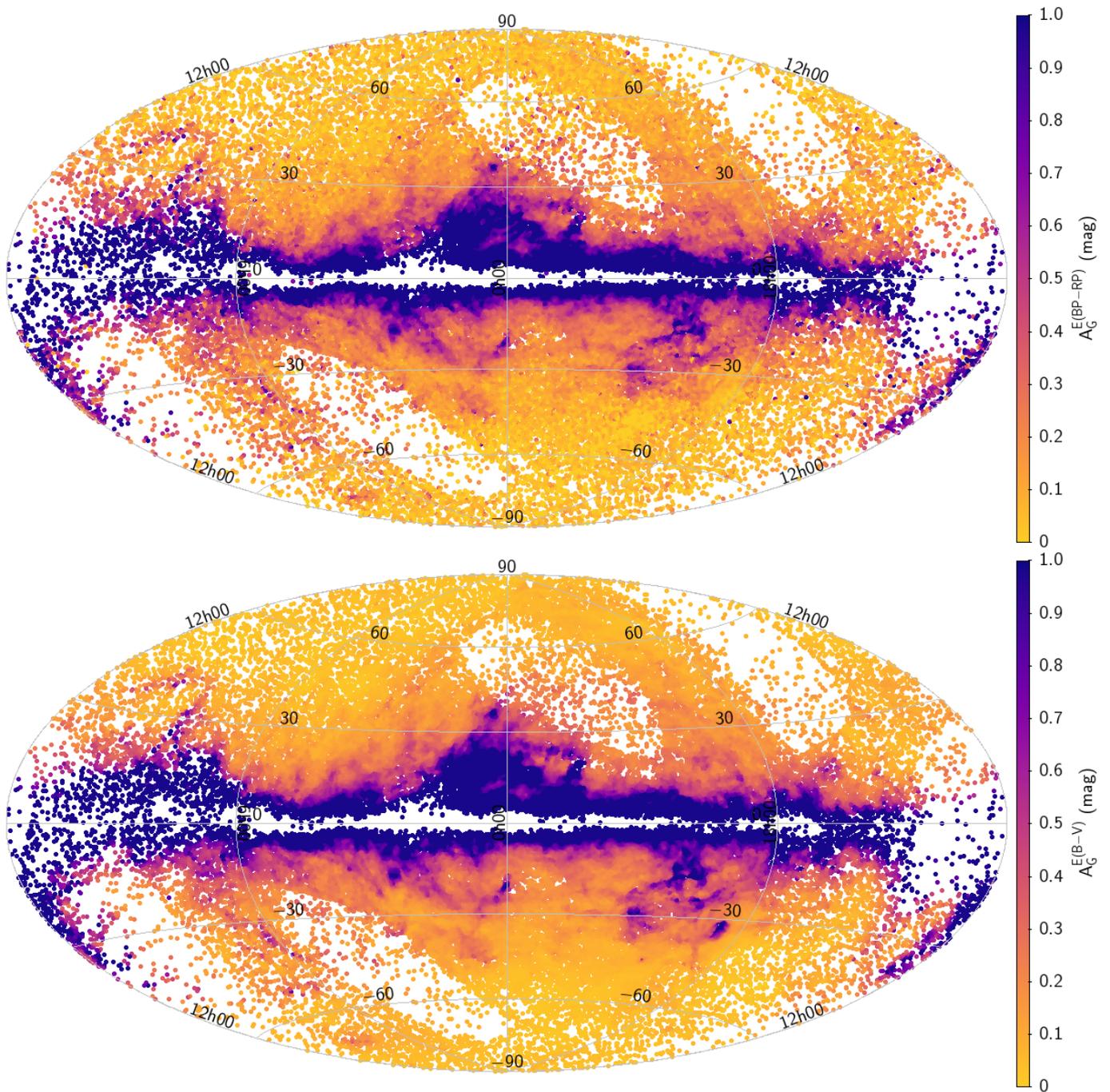


Figura 4.3: Mapa de extinción $A_G^{E(BP-RP)}$ (arriba) y $A_G^{E(B-V)}$ (abajo) de las estrellas RRL de Gaia, filtradas por las extinciones negativas, las extinciones no confiables, y las medidas con errores sistemáticos en la fotometría BP y RP .

las mismas. Nuestro mapa corrige el cálculo de extinción y de distancia, obteniendo así un mapa más suave, preciso y confiable.

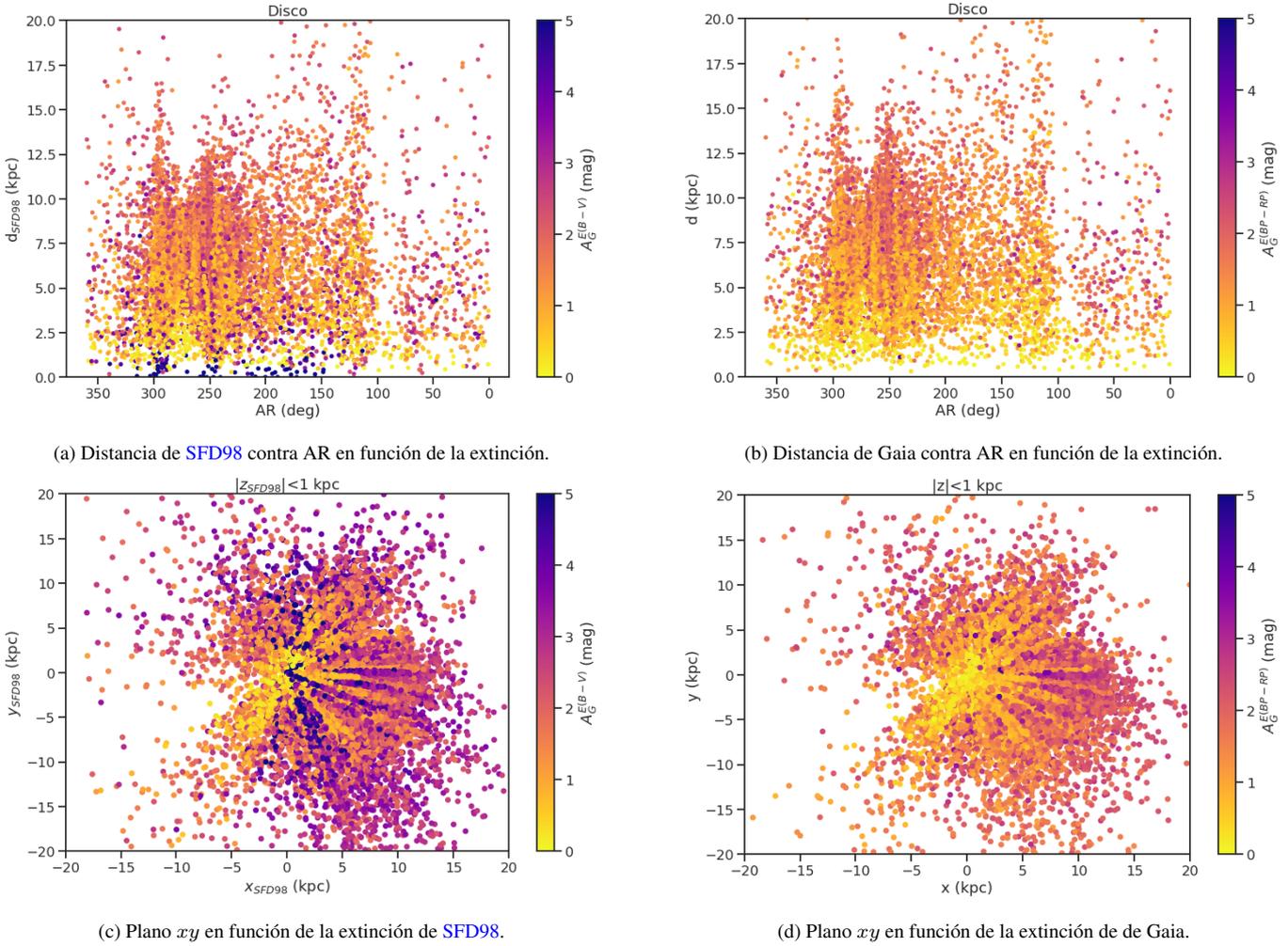
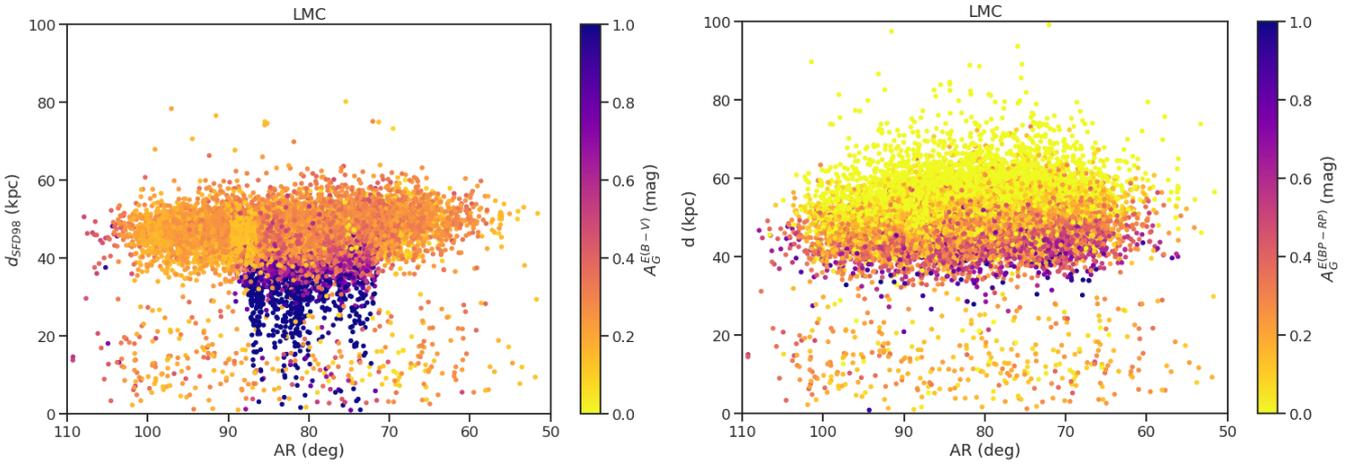


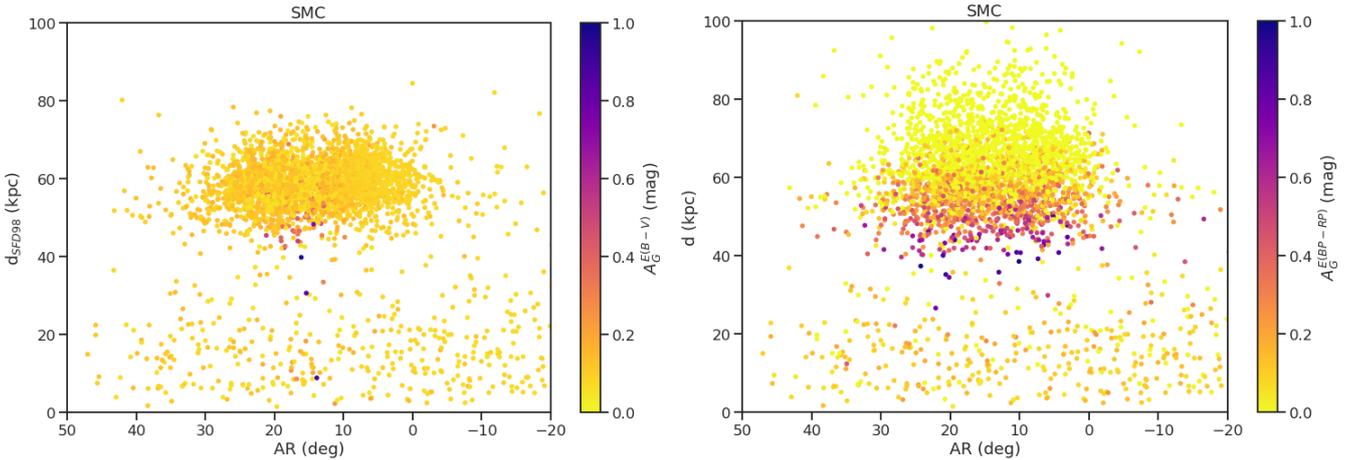
Figura 4.4: Extinción de estrellas en el Disco Galáctico ($|z| < 1$ kpc).

En la Figura 4.5 graficamos la distancia heliocéntrica contra la ascensión recta de estrellas en la dirección de las Nubes de Magallanes, en función de la extinción. Filtramos las extinciones no confiables y las medidas con errores sistemáticos en la fotometría BP y RP con `flag_confiabilidad = 1`. En esta zona del cielo hay una fuente de extinción (las Nubes) localizada, por lo que la extinción que afecta a las estrellas en la línea de visión depende fuertemente de la distancia. Las estrellas de campo que están frente a cada Nube no estarán afectadas por la extinción debida a éstas, sólo lo estarán las estrellas que estén dentro de las Nubes o por detrás. Como el mapa de SFD98 reporta la extinción total integrada en la línea de visión, ésta estará sobrestimada para las estrellas a distancias menores que la de cada Nube y, por lo tanto, las distancias inferidas serán subestimadas. En la Figura 4.5a graficamos las distancias d_{SFD98} (izquierda) y d (derecha) contra AR de estrellas en la dirección de LMC ($270^\circ < l < 290^\circ$, $-40^\circ < b < -25^\circ$)

y, en la Figura 4.5b, en la dirección de SMC ($290^\circ < l < 320^\circ$, $-50^\circ < b < -40^\circ$), en función de la extinción $A_G^{E(B-V)}$ y $A_G^{E(BP-RP)}$, respectivamente. Se aprecia claramente que las distancias d_{SFD98} de las estrellas de LMC están subestimadas debido a que las extinciones $A_G^{E(B-V)}$ están sobrestimadas en la Figura 4.5a (izquierda), como anticipamos que debería ocurrir. Este efecto se conoce como “Finger of God”. En la Figura 4.5b (izquierda), la extinción es mucho menor y más homogénea, de manera que el efecto no se aprecia tan claramente. Mientras tanto, en las Figuras 4.5a (derecha) y 4.5b (derecha) el efecto se ve corregido, implicando que la extinción $A_G^{E(BP-RP)}$ y la distancia d calculada a cada estrella obtenidas con nuestro trabajo son más confiables.



(a) Distancia de SFD98 (izquierda) y de Gaia (derecha) contra AR de estrellas en la dirección de LMC ($270^\circ < l < 290^\circ$, $-40^\circ < b < -25^\circ$) en función de la extinción $A_G^{E(B-V)}$ y $A_G^{E(BP-RP)}$, respectivamente.



(b) Distancia de SFD98 (izquierda) y de Gaia (derecha) contra AR de estrellas en la dirección de SMC ($290^\circ < l < 320^\circ$, $-50^\circ < b < -40^\circ$) en función de la extinción $A_G^{E(B-V)}$ y $A_G^{E(BP-RP)}$, respectivamente.

Figura 4.5: Distancia contra ascensión recta de estrellas en la dirección de las Nubes de Magallanes en función de la extinción.

source_id	Tipo	Per	N_{obs}	N_{min}	A_G (mag)	$err(A_G)$ (mag)	[Fe/H] (dex)	M_G (mag)	d (pc)	$err(d)$ (pc)	d_{SF098} (pc)	$err(d_{SF098})$ (pc)	f_1	f_2	f_3
5004536643949379584	RRc	0.399	29	8	0.113	0.33	-1.61	0.595	49512	8089	51275	2971	1	0	1
5005269781982326016	RRab	0.595	34	18	-0.01	0.087	-1.61	0.595	15815	1141	15502	949	1	1	1
5006194982361880832	RRab	0.585	32	7	-0.529	0.641	-1.61	0.595	80362	24218	61794	4823	1	0	1
5011772843505371008	RRab	0.606	52	15	0.063	0.071	-1.33	0.686	10155	597	10209	497	1	1	1
5013607825333232000	RRab	0.426	73	19	0.158	0.058	-0.41	0.979	3315	168	3463	143	1	1	1
5014400912517573248	RRab	0.563	46	11	0.187	0.227	-1.53	0.62	30841	3585	32338	1584	1	0	1
5016617600975614080	RRab	0.576	80	23	0.121	0.106	-1.19	0.728	17823	1216	18343	851	1	1	1
5017373343420513664	RRab	0.625	52	16	0.063	0.102	-1.21	0.724	16867	1130	16982	808	1	1	1
5017763463890548864	RRc	0.304	74	22	0.104	0.063	-1.17	0.735	7078	407	7253	352	1	1	1
4988216730297282944	RRab	0.688	49	18	0.027	0.312	-1.72	0.56	43610	6689	43389	2344	1	0	1
4989686128804389376	RRc	0.358	42	16	0.074	0.063	-1.79	0.537	7808	489	7947	434	1	1	1
4990167165141359616	RRab	0.582	39	10	0.044	0.083	-1.61	0.595	14289	1018	14284	858	1	0	1
5824825545847451648	RRc	0.317	69	15	0.84	0.091	-1.61	0.595	11675	854	9753	963	1	0	1
5824964805867811456	RRab	0.491	61	14	0.602	0.097	-0.84	0.842	11448	726	11539	600	1	0	1
5825136226553824512	RRc	0.348	29	1	0.0		-1.61	0.595	2147483647	0	47089	2147483647	0	0	0
5825251778408242816	RRab	0.591	48	11	0.99	0.105	-1.99	0.472	13167	976	11575	1067	1	0	1
5825277101525772416	RRab	0.627	45	16	0.742	0.187	-1.3	0.695	20409	2022	20330	1227	1	0	1
5825290639263641472	RRab	0.522	42	14	0.702	0.057	-1.11	0.756	3123	168	2707	207	1	0	1
5825348020030555520	RRab	0.609	34	9	1.007	0.219	-0.5	0.95	18787	2074	17210	1330	1	0	1
5825362313682986496	RRc	0.309	30	9	1.253	0.314	-1.61	0.595	33306	5215	33844	2735	1	0	0

Tabla 4.2: Extracto de la tabla final con extinciones y distancias reportadas. f_1 , f_2 , f_3 son los flags flag_num_min, flag_calibradora, flag_confiabilidad. A_G es la extinción $A_G^{E(BP-RP)}$.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se utilizaron los datos del catálogo SOS (Clementini et al., 2019) publicado dentro del Gaia Data Release 2 (DR2) para calibrar los colores intrínsecos en la fase de mínima luz de estrellas RR Lyrae (de tipos RRab y RRc) en el sistema fotométrico G , BP , RP de Gaia. Con esta calibración se calcularon extinciones y distancias más robustas para las RRL, en particular, en zonas de extinción muy variable como el plano galáctico y las Nubes de Magallanes.

Siendo éstos los resultados generales, los resultados específicos del trabajo son los siguientes:

- Se redefinió el intervalo de fase usado para el cálculo de colores en mínima luz como $\phi \in [0.4, 0.7]$. Este intervalo minimiza la dispersión en color intrínseco y es válido para estrellas RRab y RRc.
- Se definió un conjunto de 2372 estrellas calibradoras. Habiendo desenrojecido estas estrellas con el mapa de extinción de SFD98, se analizaron los residuos del ajuste de la relación color-período y se determinó que los parámetros que optimizan el conjunto, i.e. que minimizan la dispersión, son los siguientes: alta latitud galáctica $|b| > 50^\circ$; magnitud promediada en flujo $m_G < 18$; y un número mínimo N_{min} de 10 observaciones en la fase de mínima luz.
- Se calibró la relación color-período, válida para las RRL de ambos tipos (ab y c), para los tres colores posibles con las bandas de Gaia: $(BP - RP)$, $(BP - G)$ y $(G - RP)$. Los coeficientes obtenidos y la dispersión de residuos resultante para cada color se resumen en la Tabla 3.2.
- Se eligió el color $(BP - RP)_{0,min}$ como color estándar para el cálculo de extinciones, ya que este presentó el menor error en extinción en la banda G resultante de la calibración color-período, que se estimó en 0.084 mag (mediana) para las estrellas calibradoras.

- Se utilizó la calibración obtenida $(BP-RP)_{0,min} = 0.661 - 0.193 \cdot \log(\text{Per}/d) - 1.252 \cdot (\log(\text{Per}/d))^2$ para calcular la extinción A_G y la distancia d de las estrellas RR Lyrae del catálogo SOS de Gaia que cuentan con al menos 5 observaciones en la fase de mínima luz (`flag_num_min = 1`) y con fotometría confiable indicada por `phot_bp_rp_excess_factor < 1.5`, reportados en la tabla final con `flag_confiabilidad = 1`.
- Se mostró que este método es más exacto y preciso particularmente en la línea de visión a las Nubes de Magallanes y en el plano Galáctico, cuyas distancias están subestimadas si se utiliza el mapa de SFD98.

En base a la experiencia desarrollada en este proyecto se proponen las siguientes sugerencias para futuros trabajos:

- Utilizar plantillas para ajustar las curvas de luz mal muestreadas, como en el trabajo de [Vivas et al. \(2017\)](#).
- Utilizar intervalos de fase de mínima luz diferentes para cada tipo de RRL (*ab* y *c*) para reducir la dispersión en el color intrínseco en mínima luz.
- Realizar una inferencia estadística más sofisticada para reducir la cantidad de valores negativos de extinción obtenidos (por tener errores en extinción mayores o del orden de la extinción misma).
- Obtener las relaciones período-metalicidad y color-período-metalicidad.
- Determinar la propagación de errores debido a la cantidad de estrellas con períodos afectados por alias, calculado en el trabajo de [Mateu et al. \(2020\)](#).
- Calcular las distancias para las estrellas de `variClassifier` que no están en SOS Cep&RRL con los datos del próximo lanzamiento de datos de Gaia (Gaia DR3), en el que contarán con períodos y curvas de luz, usando la relación color-período obtenida en este trabajo: la calibración reportada en este trabajo será vigente ya que ésta no se verá mejorada por agregar más estrellas calibradoras, pues los errores se deben principalmente a la dispersión intrínseca de la relación.

Bibliografía

- Bessell, M. S. 2005, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 43, 293
- Blanco, V. M. 1992, *AJ*, 104, 734
- Catelan, M., & Smith, H. 2015, *Pulsating Stars*
- Clementini, G. et al. 2019, *A&A*, 622, A60
- DES Collaboration et al. 2005, *The Dark Energy Survey*
- Evans, D. W. et al. 2018, *A&A*, 616, A4
- Gaia Collaboration et al. 2018a, *A&A*, 616, A10
- . 2016, *A&A*, 595, A2
- . 2018b, *A&A*, 616, A1
- Guldenschuh, K. A. et al. 2005, *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117, 721
- Høg, E. et al. 2000, *A&A*, 355, L27
- Holl, B. et al. 2018, *A&A*, 618, A30
- Jayasinghe, T. et al. 2019, *MNRAS*, 485, 961
- Kunder, A., Chaboyer, B., & Layden, A. 2010, *AJ*, 139, 415
- Mateu, C., Holl, B., De Ridder, J., & Rimoldini, L. 2020, *MNRAS*
- Mateu, C., Vivas, A. K., Downes, J. J., Briceño, C., Zinn, R., & Cruz-Díaz, G. 2012, *MNRAS*, 427, 3374
- Mateu, C., & Vivas, K. 2011, PhD thesis, Universidad Central de Venezuela
- Muraveva, T., Delgado, H. E., Clementini, G., Sarro, L. M., & Garofalo, A. 2018a, *MNRAS*, 481, 1195

- Muraveva, T., Garofalo, A., Scowcroft, V., Clementini, G., Freedman, W. L., Madore, B. F., & Monson, A. J. 2018b, *MNRAS*, 480, 4138
- Pogson, N. 1856, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 17, 12
- Ramos, P., Mateu, C., Antoja, T., Helmi, A., Castro-Ginard, A., & Balbinot, E. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2002.11142
- Riello, M. et al. 2018, *Astronomy Astrophysics*, 616, A3
- Rimoldini, L. et al. 2019, *A&A*, 625, A97
- Salaris, M., & Cassisi, S. 2005, *Evolution of Stars and Stellar Populations* (Wiley)
- Schlafly, E. F., & Finkbeiner, D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
- Sesar, B. et al. 2017, *AJ*, 153, 204
- . 2010, *ApJ*, 708, 717
- Smith, H. A. 1995, *RR Lyrae Stars*, Cambridge Astrophysics Series
- Stringer, K. M. et al. 2019, *AJ*, 158, 16
- Sturch, C. 1966, *Astrophys. J.* 143, 143, 774
- Udalski, A., Szymański, M. K., & Szymański, G. 2015, *OGLE-IV: Fourth Phase of the Optical Gravitational Lensing Experiment*
- Vivas, A. K. et al. 2017, *AJ*, 154, 85
- . 2004, *AJ*, 127, 1158