

Cinemática de las poblaciones estelares en galaxias a través del ajuste espectral: Comparativa pPXF vs Starlight.

Kinematics of stellar populations in galaxies through spectral adjustment: Comparison pPXF vs Starlight.

Hernán Emilio Jácame Delgado¹, Marcel Chow Martínez²

¹ORCID 0009-0002-2138-099X, hernanjacamo@hotmail.com

²ORCID 0000-0001-6073-9956, marcel.chow@unan.edu.ni

¹Departamento de Física, Área de conocimiento de ciencias básicas y tecnología, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

²Centro de Investigación de Astrofísica y Ciencias Espaciales (CIACE), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua), C.P. 663, Managua, Nicaragua.

Resumen

La síntesis de poblaciones estelares permite resolver una región estelar a partir de la descomposición de su espectro como una combinación lineal de diferentes poblaciones estelares más simples. En este trabajo se presentan una comparación entre dos softwares para realizar la síntesis, basados en dos de los códigos más populares para dicho fin: a través de STARLIGHT, basado en cadenas de Markov, y a través de pPXF, basado en calcular los múltiples momentos de una distribución parametrizada de Hermite. Estos programas fueron implementados sobre la galaxia Arp 143, una galaxia que ha sufrido una fuerte colisión y que está en un estado muy fuerte de alteración cinemática. Nuestros resultados apuntan a que los ajustes estadísticos encontrados con pPXF obtienen mejores valores de χ^2 . Además, gráficos de correlación muestran importantes sesgos en los parámetros cinemáticos (v_* y σ_*) calculados a través de los métodos. Un análisis de la distribución usando gráficos de caja ("boxplots") apunta que las velocidades encontradas por pPXF son 3 veces más altas que las estimadas por STARLIGHT. Esto podría deberse a las complicadas condiciones cinemáticas que está sufriendo dicha galaxia. La prueba χ^2 nos sugiere que los ajustes obtenidos con pPXF son más confiables que los encontrados con STARLIGHT.

Palabras clave: Galaxias, síntesis de poblaciones estelares, cinemática.

1. INTRODUCCIÓN

Las galaxias son consideradas los bloques básicos del universo, capaces de contener miles de millones de estrellas, embebidas en gas y polvo. Toda la información de la galaxia está integrada en su luz y una de las formas de recolectar y analizar esa luz es a través de la Espectroscopia de Campo Integral (Integral Field Spectroscopy; IFS). Esta es una técnica que, a diferencia de la espectroscopia tradicional, que obtiene un espectro para toda la galaxia, divide la galaxia en muchas celdas o segmentos en el campo de visión. La luz que llega de cada celda del campo es pasada individualmente por una rejilla de difracción lo cual genera un espectro para esa región.

Al final del procedimiento, todos los espectros obtenidos son ordenados en un cubo de datos que consiste en tener todo el campo de visión 2D más una tercera dimensión que es el valor del flujo para cada longitud de onda. Todo esto con el fin de proporcionar una visión más detallada y segmentada de las galaxias, Sánchez y cols. (2012).

En conjunto con la IFS se emplea la técnica de ajuste de espectro por Síntesis de Poblaciones Estelares. La idea básica tras este método es descomponer el espectro observado en función de espectros que corresponden a poblaciones estelares más simples (Simple Stellar Populations; Bruzual y Charlot, 2003); estos últimos son llamados espectros base, cuyos parámetros físicos deben coincidir con los parámetros del espectro observado. De esta forma, el método permite extraer información tal como parámetros cinemáticos estelares (velocidades estelares en la línea de visión y dispersión de velocidades) así como edades y composición química de las poblaciones estelares.

Abstract

Stellar population synthesis allows to resolve a stellar region from the decomposition of its spectrum as a linear combination of different simple stellar populations. In this work we present a comparison between two software packages to perform the synthesis, based on two of the most popular codes for this purpose: STARLIGHT, based on Markov chains, and pPXF, based on computing the multiple moments of a parametrized Hermite distribution. These software packages were implemented on the Arp 143 galaxy, a galaxy that has undergone a strong collision and is in a very strong state of kinematic disturbance. Our results point out that the statistical fits found with pPXF obtain better values of χ^2 . Moreover, correlation plots show significant biases in the kinematic parameters (v_* and σ_*) calculated through the methods. An analysis of the distribution using boxplots shows that the velocities found by pPXF are 3 times higher than those estimated with STARLIGHT. This could be due to the complicated kinematic conditions that this galaxy is undergoing. The χ^2 test suggests that the fits obtained with pPXF are more reliable than those found with STARLIGHT.

Keywords: Galaxies, stellar population synthesis, kinematics.

Este procedimiento ha sido ampliamente utilizado en grandes consorcios de observación de galaxias, como por ejemplo Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Westfall y cols., 2019) o Calar Alto Legacy Integral Field Survey (CALIFA) (Sánchez y cols., 2016). En la actualidad, existen diversos softwares diseñados para realizar ajustes de espectros. De estos destacan pPXF (Cappellari, 2023) y Starlight (Westfall y cols., 2019), ambos liberados para el uso público. Dado que los resultados dependen directamente de la calidad del ajuste del espectro, es importante conocer cuál de ambos softwares proporciona un mejor ajuste del espectro observado.

Para abordar tal objetivo realizamos un análisis estadístico de la calidad de los ajustes de los espectros y contrastamos los resultados de los parámetros cinemáticos obtenidos de cada programa.

Los análisis anteriores los realizamos sobre datos observacionales de una galaxia anillada. Este tipo de galaxias presentan una morfología inusual con forma de anillo y de las cuales ya se lleva un catálogo de estas en Appleton y Struck-Marcell (1996). La formación de estas estructuras es el resultado de una colisión entre dos galaxias en la cual una de ellas tiene que ser una galaxia con morfología de disco (espiral o lenticular) y la otra tiene que ser una galaxia elíptica compacta. Además de esto la galaxia elíptica compacta debe atravesar a la otra galaxia en una trayectoria casi perpendicular ($\sim 90^\circ$) al disco.

Como consecuencia de esta colisión se genera una onda de densidad en forma de anillo que se expande radialmente desde el punto de contacto hacia afuera en la galaxia espiral haciendo que por donde la onda se vaya desplazando se inicie un brote de formación estelar (starburst) y debido a que aumenta el número de estrellas se observa un mayor brillo proveniente de esas regiones haciendo observable el anillo.

En este artículo estamos principalmente interesados en el movimiento de las estrellas internamente dentro de este tipo de galaxia. Para esto, se usaron datos IFS que nos permitieron estimar, vía corrimiento Doppler, velocidades y dispersión de velocidades (v_* y σ_*) en la línea de visión, con el fin de desentrañar cómo se modifica la dinámica interna cuando ocurren colisiones de esta naturaleza. El contenido del artículo está organizado de la siguiente manera: descripciones sobre el funcionamiento de pPXF y Starlight son descritos en la sección 2. La sección 3 provee información sobre el origen de los datos. La metodología y análisis de los datos en la sección 4. Presentación de los resultados en la sección 5 finalizando con las conclusiones que se muestran en la sección 6.

2. DESCRIPCIÓN PPXF Y STARLIGHT

2.1 Ajuste de los espectros de las galaxias

Dado un espectro galáctico observado O_λ su ajuste sintético se realiza mediante una combinación lineal de poblaciones estelares simples. Cada una de estas poblaciones tendrá un peso estadístico en el resultado final que será un espectro sintético M_λ obtenido de la suma de todas las poblaciones.

$$M_\lambda = \sum_i w_i T_i(\lambda) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde w_i es el peso estadístico que le corresponde a cada población estelar simple y T_i es el espectro de la población estelar simple.

La ecuación (1) es la forma más básica para realizar un ajuste, pero en la práctica se toman en cuenta otros parámetros físicos. El objetivo es el conocer que poblaciones estelares simples componen la galaxia, y con ello conocer su evolución, composición química y para este caso de estudio los parámetros cinemáticos.

2.2 PPXF

pPXF utiliza el método de ajuste de pixeles penalizados. Para ello previamente define una función $g_n(\lambda)$ que describe un espectro espectral individual $T_n(\lambda)$ convolucionado con la distribución de velocidades a lo largo de la línea de visión $\mathcal{L}_n(v)$, $g_n(\lambda) = T_n(\lambda) * \mathcal{L}_n(v)$. De este modo la ecuación (1) toma la siguiente forma de acuerdo con (Cappellari, 2023):

$$M_\lambda = \sum_{n=1}^N w_n \left[g_n(\lambda) A_n(\lambda) \sum_{k=1}^K a_k P_k(\lambda) \right] + \sum_{j=1}^J b_j P_j(\lambda) + \sum_{l=1}^L c_l S_l(\lambda) \quad (\text{Ecuación 2})$$

en donde $A_n(\lambda)$ es una función de atenuación para cada espectro, $P_k(\lambda)$ y $P_l(\lambda)$ son polinomios multiplicativos y aditivos respectivamente y S_j es el espectro óptico del cielo.

La distribución de velocidades a lo largo de la línea de visión está parametrizada usando una cuadratura de Gauss-Hermite y de esa forma la distribución de velocidades a lo largo de la línea de visión tiene la siguiente forma:

$$\mathcal{L}(y) = \frac{\exp(-y^2/2)}{\sigma \sqrt{2\pi}} \left[1 + \sum_{m=3}^M b_m H_m(y) \right], \quad y = (v - V)/\sigma. \quad (\text{Ecuación 3})$$

Finalmente se implementa el método de ajuste de pixeles penalizados con el objetivo de reducir el ruido en la cinemática recuperada y de esa manera se obtiene la siguiente función:

$$\chi_p^2 = \chi^2 + \alpha \mathcal{P} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde χ^2 es un parámetro estadístico que mide la concordancia entre el espectro sintético ajustado M_λ y el espectro de la galaxia observada O_λ (Mientras menor sea el valor de χ^2 , más cercano será el espectro sintético al observado, de modo que queremos minimizar lo más posible el valor de este parámetro para obtener un mejor ajuste), ρ es una función de penalización que describe la desviación del LOSVD de una gaussiana, mientras que α es una penalización ajustable que depende del valor de señal a ruido (SNR) del espectro: cuando SNR es muy alto la importancia de $\alpha \rho$ disminuye y lo contrario cuando SNR es muy bajo.

2.3 Starlight

Starlight al igual que ppxf busca minimizar χ^2 pero en lugar de resolverlo como un problema de mínimos cuadrados no lineales como pPXF, Starlight hace uso de la técnica de Monte Carlo a través de una Cadena de Markov optimizada usando un algoritmo Metropolis Run. La ecuación (1) para Starlight para encontrar el espectro ajustado se define como (Westfall y cols., 2019).

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \left(\sum_{j=1}^{N_s} x_j b_{j,\lambda} \right) \otimes G(v_*, \sigma_*), \quad (\text{Ecuación 5})$$

Figura 1

Galaxia ARP 143. Credits: NASA – Hubble.



Donde M_λ es el espectro sintético ajustado, M_{λ_0} es el flujo sintético normalizado respecto al flujo en una longitud de onda determinada, $b_{j,\lambda}$ es la j -ésima población normalizada en λ_0 , y $r_\lambda = 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$ y \otimes denota una convolución con filtro gaussiano centrado en la velocidad v_* y en la dispersión σ_* .

La expresión de χ^2 que Starlight utiliza y que busca minimizar es:

$$\chi^2 = \sum_\lambda [(O_\lambda - M_\lambda) w_\lambda]^2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde $w_\lambda = e^{\lambda^2 - 1}$ un peso estadístico asociado a la incertidumbre asociada con la observación en la longitud de onda λ .

3. Datos

Los datos pertenecen a la galaxia Arp 143 (1), galaxia del tipo colisional con una morfología de anillo. Esta galaxia es parte del catálogo de Appleton y Struck-Marcell (1996), su naturaleza de galaxia anillada colisional fue comprobada por Romano y cols. (2008) y más tarde retomada por Chow-Martinez (artículo en proceso).

Las observaciones fueron llevadas a cabo en el telescopio de 3.5 m en el Observatorio de Calar Alto (Almería, España), usando el espectrómetro PMAS/PPaK capaz de producir datos IFS y con una resolución instrumental (Full Width at Half Maximum; FWHM) de 6 Å ($\sim 327 \cdot \text{Kms}^{-1}$) (Husemann y cols., 2013).

La reducción de los datos se llevó a cabo con el procedimiento descrito en Husemann y cols. (2013), García-Benito y cols. (2015), Sánchez y cols. (2016), siguiendo el esquema de reducción de Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey (CALIFA) produciendo 2 cubos de datos espectrales de V1200 y V500.

Por último, se combinaron los cubos espectrales de V1200 con los de V500 para obtener un cubo combinado de datos (COMB), al promediar el flujo en la región de solapamiento en longitud de onda y remuestrear al rango espectral de la V1200 a la resolución de la V500.

4. MÉTODO DE ANÁLISIS

4.1 Síntesis de poblaciones estelares

El cubo combinado (COMB) fue preparado para realizar la síntesis de poblaciones estelares de tal manera que la longitud de onda de los espectros fue desplazada al marco de referencia de la galaxia mediante la ecuación:

$$\lambda_{observada} = \lambda_{emitida}(1 + z) \quad (\text{Ecuación 7})$$

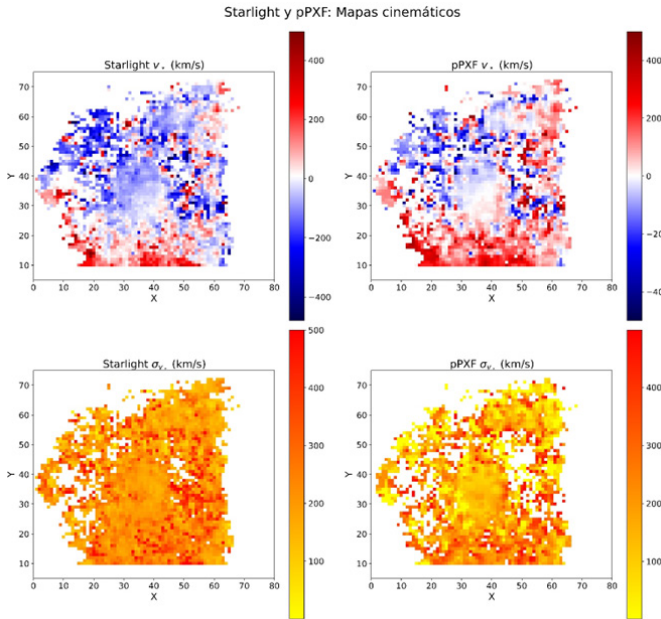
En donde $z = 0.01295$ es el redshift de la galaxia.

Se realizó la síntesis de poblaciones estelares del cubo utilizando ambos programas descritos en la sección 2. Para pPXF se utilizó la biblioteca de poblaciones estelares FSPS (Flexible Stellar Population Synthesis) (Conroy y Gunn, 2010), en el caso de Starlight se seleccionaron las poblaciones estelares simples adoptadas por Asari y cols. (2007).

En ambos programas se enmascararon las líneas de emisión debido a que para obtener los parámetros cinemáticos estas líneas no forman parte del espectro estelar y si no se enmascararan, el programa intentara ajustarlo.

Figura 2

Mapa de velocidades de la galaxia en la primer fila y mapa de dispersión de velocidades en la segunda, siendo la primera columna obtenido por Starlight y en la segunda obtenida por pPXF.



Para ambos casos guardamos los resultados de la velocidad estelar v_* y la dispersión de velocidades estelares σ_* de aquellos spaxels en los cuales la señal a ruido fue mayor a 8 ($SN > 8$). Luego se hizo uso de técnicas estadísticas que se describen a continuación:

3.1 Chi-Cuadrado

Una forma de conocer que tan bien un programa realizo el ajuste se acude a utilizar la prueba de Chi-cuadrado el cual consiste en comparar que tanto coinciden dos modelos, lo cual para nuestro caso de estudio esos modelos serían el espectro observado O_λ y el espectro ajustado resultante M_λ mediante la ecuación:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} \frac{(O_{\lambda} - M_{\lambda})^2}{M_{\lambda}} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde λ es longitud de onda, O_λ y M_λ son los valores del flujo en esa longitud de onda de los espectros observado y ajustado respectivamente. A medida que $\chi^2 \rightarrow 0$ implica un mejor ajuste y por lo tanto un mejor resultado.

5. RESULTADOS

En la figura 2 tenemos el mapa que resulta de graficar todos los spaxels con sus respectivas velocidades estelares (primera fila) y dispersión de velocidades estelares (segunda fila) de ambos programas.

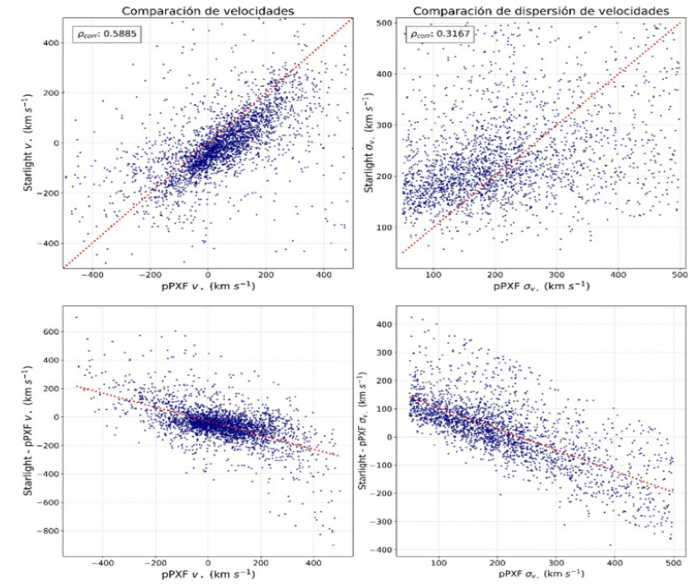
Las regiones en donde predomina el color rojo son zonas en donde las estrellas se alejan de nosotros y las zonas de color azul son al contrario donde las estrellas se acercan a nosotros en el mapa de velocidades estelares.

Se observa cómo ambos programas son consistentes sobre el sentido de rotación de la galaxia siendo la parte superior izquierda acercándose, la región que se está alejando en la parte superior derecha puede estar debido a la galaxia compacta que colisionó y está atrayendo material de la otra galaxia que colisiono. En el mapa de dispersión de velocidades se alcanza a ver un anillo interior en el cuales los valores de dispersión son muy altos rondando los 500 Kms^{-1} .

A través de un análisis de correlación de Pearson podemos obtener información acerca de qué tanto están relacionados los resultados entre ambos programas. Esto se muestra en la figura 3 En los gráficos superiores, se presentan las velocidades de starlight en función de las velocidades de pPXF, además del valor del coeficiente de correlación de Pearson calculado para cada caso. Para las velocidades, el coeficiente es de 0.5885, lo que indica una correlación positiva moderada, sugiriendo que ambos programas producen resultados que siguen un patrón similar (son moderadamente consistentes entre sí) pero no es una correlación perfecta (en tal caso el valor de coeficiente hubiera sido 1 y ambos programas darían resultados idénticos).

Figura 3

Comparación de resultados entre pPXF y Starlight para la determinación de velocidades estelares y dispersión de velocidades estelares para todo el cubo de datos. Los gráficos superiores muestran la relación directa entre los valores de ambos programas. Los gráficos inferiores se observa las discrepancias entre ambos resultados.



En cuanto a la dispersión de velocidades σ_* , el coeficiente de correlación es más bajo (0.316) lo que indica una correlación débil, es decir, lo que indica que para el cálculo de las dispersiones de velocidades ambos programas tienden a producir resultados mucho más dispares.

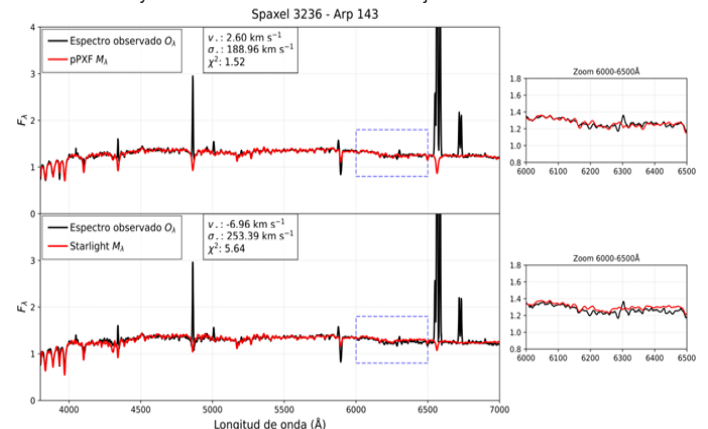
Para las gráficas de la segunda fila de la Figura 3, ambos gráficos muestran una clara tendencia descendente, indicada por una línea de regresión lineal (línea roja), lo que evidencia un sesgo sistemático entre los dos métodos. En el caso de la velocidad (panel izquierdo), observamos que Starlight tiende a medir velocidades ligeramente más bajas que pPXF en el rango $v_*, pPXF > -150 \text{ Km s}^{-1}$. Por otro lado, para valores de $v_*, pPXF < -150 \text{ Km s}^{-1}$, Starlight generalmente mide velocidades más altas que pPXF.

En la figura 4 tenemos una comparación del ajuste espectral obtenido de cada programa para el spaxel 3236, el ajuste de pPXF presenta un valor de χ^2 menor que el ajuste de Starlight, lo cual nos indica que la solución de pPXF es mejor con respecto al espectro observado, es decir hizo un mejor ajuste. Esto es evidente en algunas regiones del espectro en los que la solución de Starlight claramente se desvía del espectro observado (por ejemplo, alrededor de $\lambda = 4400$).

Con respecto a los parámetros cinemáticos ajustados en este spaxel, ambos programas no discrepan mucho en los resultados de las velocidades estelares (lo cual es consistente con lo que habíamos visto en la figura 4. Así mismo la dispersión de velocidades muestra una mayor discrepancia, aunque dentro del margen de error instrumental.

Figura 4

Comparación en el espectro observado para el spaxel con identificación 3236 de Arp 143 (línea negra) y los ajustes realizados con los modelos pPXF (arriba, línea roja) y Starlight (abajo, línea roja). En ambos paneles se muestran los parámetros cinemáticos calculados, incluyendo la velocidad estelar v_* , la dispersión de velocidades σ_* y el valor de χ^2 asociado a cada ajuste.



Observando por último la figura 5 tenemos un diagrama de cajas (box-plot) respecto a las velocidades encontradas por ambos softwares. Los boxplots son diagramas que se basan en los cuartiles para su construcción. La línea roja marca la posición de la mediana mientras que los bordes superiores de las cajas encierran el rango entre el primer y tercer cuartil (datos entre el 25% y 75%). Los "bigotes" que se extienden por debajo y encima de las cajas marcan los puntos dentro del rango de 1.5 la distancia intercuartil hacia el límite superior e inferior de las cajas, respectivamente. Estos gráficos, por ende, son muy útiles para comparar poblaciones y señalar asimetrías en la distribución de los datos.

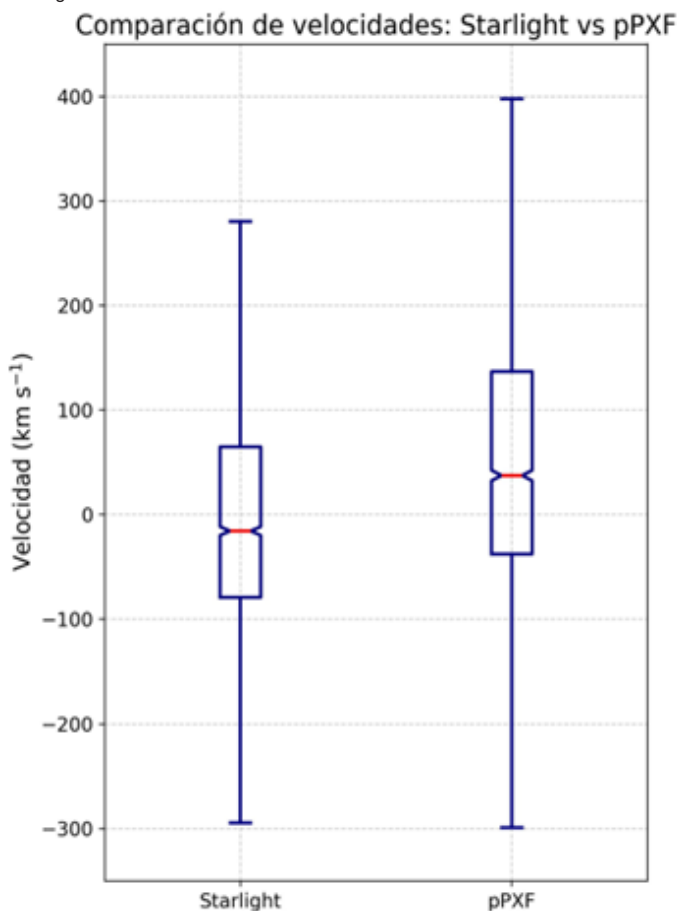
A primera vista se ve como la mediana de Starlight esta desplazada ligeramente para los valores negativos a diferencia de pPXF que esta hacia los positivos. Esto sugiere que, en promedio, Starlight tiende a calcular velocidades un poco menores que pPXF (lo que ya veníamos observando en figuras anteriores).

6. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre pPXF y Starlight aplicado a la galaxia Arp 143 reveló varias diferencias importantes en la estimación de parámetros cinemáticos: se encontró una correlación moderada en las velocidades estelares v_* , con un coeficiente de Pearson de 0.59, lo que sugiere patrones similares, aunque no idénticos. Para la dispersión de velocidad σ_* , la correlación fue más débil (0.32), indicando que los resultados son menos consistentes entre ambos programas en este aspecto. Además, se observó como Starlight tiende a dar velocidades ligeramente menores que pPXF en ciertos rangos, y en velocidades más negativas, Starlight reporta valores más altos que pPXF. Este comportamiento, visible también en el análisis de caja (boxplot), muestra que la mediana de Starlight está desplazada hacia valores negativos, mientras que pPXF tiene una mediana ligeramente positiva. Por último, para un spaxel, en concreto 3236 del cubo de datos vemos como basándonos en el resultado del χ^2 nos dice que pPXF hizo un mejor ajuste espectral que Starlight con lo cual pPXF da mejores resultados para los parámetros cinemáticos debido a que las velocidades estelares depende

Figura 5

Boxplot de comparación de velocidades entre Starlight y pPXF. La línea roja indica la mediana, mientras que los límites de las cajas representan el primer y tercer cuartil. Los "bigotes" muestran los datos dentro de ± 1.5 veces la distancia intercuartil.



de que los picos del espectro estén bien alineados y la dispersión de velocidades de la anchura de estos, es por esto que un mejor ajuste induce a mejores resultados concluyendo de que obtendremos mejores resultados al utilizar pPXF para estudiar el movimiento de las estrellas de esta galaxia.

7. REFERENCIAS

- Appleton, P. N., y Struck-Marcell, C. (1996, enero). Collisional Ring Galaxies. *Fundamentals of Cosmic Physics*, 16, 111-220.
- Asari, N. V., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Torres-Papaqui, J. P., Mateus, A., Sodré, L., ... Gomes, J. M. (2007, octubre). The history of starforming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381(1), 263-279. doi:10.1111/j.1365-2966.2007.12255.x
- Bruzual, G., y Charlot, S. (2003, octubre). Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 344(4), 1000-1028. doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06897.x
- Cappellari, M. (2023). Full spectrum fitting with photometry in PPXF: stellar population versus dynamical masses, non-parametric star formation history and metallicity for 3200 LEGA-C galaxies at redshift $z \approx 0.8$. *MNRAS*, 526, 3273-3300. doi:10.1093/mnras/stad2597
- Conroy, C., y Gunn, J. E. (2010, abril). The Propagation of Uncertainties in Stellar Population Synthesis Modeling. III. Model Calibration, Comparison, and Evaluation. *The Astro-physical Journal*, 712(2), 833-857. doi:10.1088/0004-637X/712/2/833
- García-Benito, R., Zibetti, S., Sánchez, S. F., Husemann, B., de Amorim, A. L., Castillo-Morales, A., ... Aceituno, J. (2015, abril). CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. III. Second public data release. *Astronomy and Astrophysics*, 576, A135. doi:10.1051/0004-6361/201425080
- Husemann, B., Jahnke, K., Sánchez, S. F., Barrado, D., Bekeraïté, S., Bomans, D. J., ... Ziegler, B. (2013, enero). CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. II. First public data release. *Astronomy and Astrophysics*, 549, A87. doi:10.1051/0004-6361/201220582
- Romano, R., Mayya, Y. D., y Vorobyov, E. I. (2008, septiembre). Stellar Disks of Collisional Ring Galaxies. I. New Multi-band Images, Radial Intensity and Color Profiles, and Confrontation with N-Body Simulations. *The Astronomical Journal*, 136(3), 1259-1289. doi:10.1088/0004-6256/136/3/1259
- Sánchez, S. F., García-Benito, R., Zibetti, S., Walcher, C. J., Husemann, B., Mendoza, M. A., ... Ziegler, B. (2016, octubre). CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. IV. Third public data release. *Astronomy and Astrophysics*, 594, A36. doi:10.1051/0004-6361/201628661
- Sánchez, S. F., Rosales-Ortega, F. F., Marino, R. A., Iglesias-Páramo, J., Vilchez, J. M., Kennicutt, R. C., ... Ellis, S. (2012, octubre). Integral field spectroscopy of a sample of nearby galaxies. II. Properties of the H II regions. *Astronomy and Astrophysics*, 546, A2. doi:10.1051/0004-6361/201219578
- Westfall, K. B., Cappellari, M., Bershady, M. A., Bundy, K., Belfiore, F., Ji, X., ... Zhou, S. (2019, diciembre). The Data Analysis Pipeline for the SDSS-IV MaNGA IFU Galaxy Survey: Overview. *The Astronomical Journal*, 158(6), 231. doi:10.3847/1538-3881/ab44a2