

# AVALIAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE DADOS ASTRONÔMICOS PARA ESTUDOS FOCADOS NA CINEMÁTICA ESTELAR E DO GÁS

Leonardo Del Bel Sonoda <sup>1</sup>; Roberto Bertoldo Menezes <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

<sup>2</sup> Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

**Resumo.** *Este trabalho estuda a eficácia de uma metodologia de tratamento de dados acerca da cinemática estelar e do gás em galáxias, direcionado à determinação das massas, e suas incertezas, de buracos negros supermassivos – SMBHs (supermassive black holes) em seus núcleos; tendo como objeto de estudo o cubo de dados da região central da galáxia NGC 3115. O método desenvolvido por um grupo de pesquisa do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), visa a remoção de efeitos instrumentais e a melhora na resolução espacial dos dados observados, utilizando a filtragem de Butterworth e a deconvolução de Richardson-Lucy. A massa do SMBH é obtida a partir da cinemática estelar da galáxia, aplicando o método de Jeans em conjunto do método Penalized Pixel Fitting – pPXF. Para avaliar quantitativamente o tratamento, é obtida a massa, e sua incerteza, em três situações: anterior a ele, após o processo de filtragem e posterior à deconvolução. Assim, é possível analisar o efeito de cada etapa do tratamento.*

## Introdução

Atualmente, o estudo e determinação das massas de buracos negros supermassivos – SMBHs (*supermassive black holes*) presentes nos núcleos de galáxias massivas é um tema muito relevante na astrofísica. Isso está relacionado com a importância dos núcleos de galáxias, que fornecem informações sobre a formação e evolução de galáxias. Junto disso, a correlação de certos dados dessas galáxias com a massa desses SMBHs indica uma possível coevolução entre esses dois objetos astronômicos.

Dessa maneira, esse estudo tem como objetivo avaliar a eficácia de uma metodologia de tratamento de dados, a ser aplicada a cubos de dados astronômicos, desenvolvida por um grupo de pesquisa do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), anteriormente liderada pelo prof. João E. Steiner (Menezes et al. 2019). Mais detalhadamente, esse trabalho vai estudar o método acerca da cinemática estelar e do gás em galáxias, concluindo-se na determinação da massa, e sua incerteza, do SMBH localizado no núcleo da galáxia NGC 3115.

Para maior entendimento, será determinada a massa, e sua incerteza, em três cenários: o primeiro sem passar pelo método, o segundo após um de seus processos e o terceiro, posterior ao último processo.

O tratamento de dados analisado basicamente apresenta dois processos: a filtragem espacial de Butterworth (Gonzalez & Woods 2002) e a deconvolução de Richardson-Lucy (Richardson 1972; Lucy 1974). Esses dois processos permitem a retirada de ruídos de alta frequência e a melhora na resolução dos dados. A massa do SMBH é determinada analisando a cinemática estelar, assim, será aplicado o método de Jeans desenvolvido por Cappellari (2008) em conjunto com o método *Penalized Pixel Fitting* – pPXF (Cappellari & Emsellem 2004).

## Material e Métodos

Cubos de dados são conjuntos de dados astronômicos com duas dimensões espaciais e uma dimensão espectral. Dessa forma, em um cubo de dados, é possível obter imagens de um mesmo objeto, em diferentes comprimentos de onda, e também espectros de diferentes regiões espaciais desse objeto. O cubo de dados da região central da galáxia NGC 3115 foi obtido através do *Integral Field Unit* (IFU) do *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS), no telescópio Gemini Sul. Esses dados estão disponíveis no banco de dados público desse telescópio (<https://archive.gemini.edu/searchform>) e apresentam campo de visão 4.5" x 2.3", com pixels espaciais de 0.05". Foi feito o tratamento desse cubo de dados, passando pela filtragem espacial de Butterworth, que foca em remover ruídos de alta frequência espacial das imagens do cubo, e a deconvolução de Richardson-Lucy, que tem como propósito a melhora na resolução espacial das imagens do cubo.

Com esse procedimento, tem-se então três cubos de dados: o primeiro sem o tratamento, o segundo depois de passar pelo filtro e o terceiro após a deconvolução; a soma das imagens do cubo deconvoluído ao lado do seu espectro médio podem ser vistos na Figura 1. Para uma boa avaliação do impacto da metodologia, foi determinada a massa do buraco negro para cada um, utilizando a cinemática estelar da região central da galáxia. Assim, inicialmente foi utilizado o método do pPXF para cada espectro do cubo. Esse método extrai os parâmetros cinemáticos de uma galáxia a partir do seu espectro, mais precisamente, ele ajusta os espectros estelares observados com uma combinação de espectros de populações estelares de uma base, convoluídos com uma expansão de Gauss-Hermite. Nesse trabalho, foi utilizada uma base de espectros de populações estelares baseada na *Medium-resolution Isaac Newton Telescope Library of Empirical Spectra* – MILES (Sánchez-Blázquez et al. 2006). Como esse procedimento foi aplicado a cada um dos espectros do cubo de dados, foram obtidos os mapas de dispersão de velocidades estelar (Figura 2), de velocidade radial estelar (Figura 3) e dos coeficientes de Gauss-Hermite  $h_3$  e  $h_4$  (devido aos propósitos desse trabalho, esses dois últimos mapas não foram utilizados na análise).

Figura 1 – Imagem correspondente à soma de todas as imagens do cubo pós-tratamento, junto com o seu espectro médio.

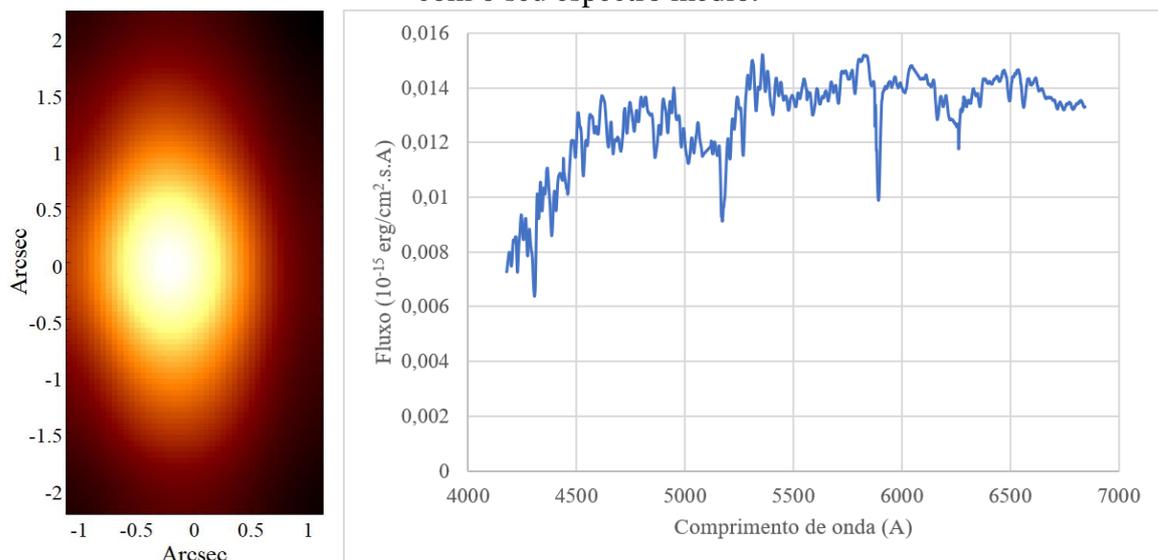


Figura 2 – Mapas da dispersão de velocidades estelar no cubo bruto (a), cubo filtrado (b) e cubo deconvoluído (c).

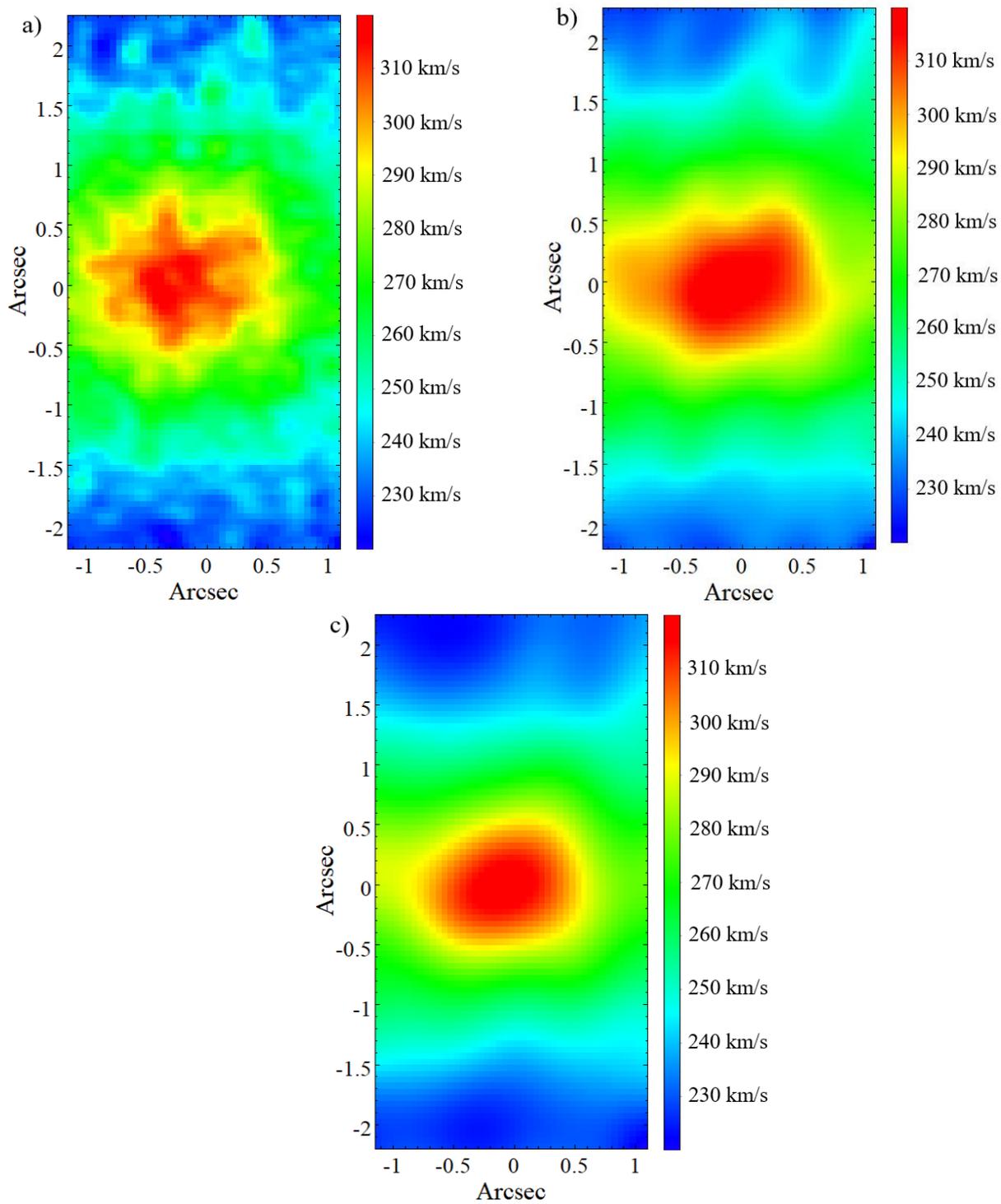
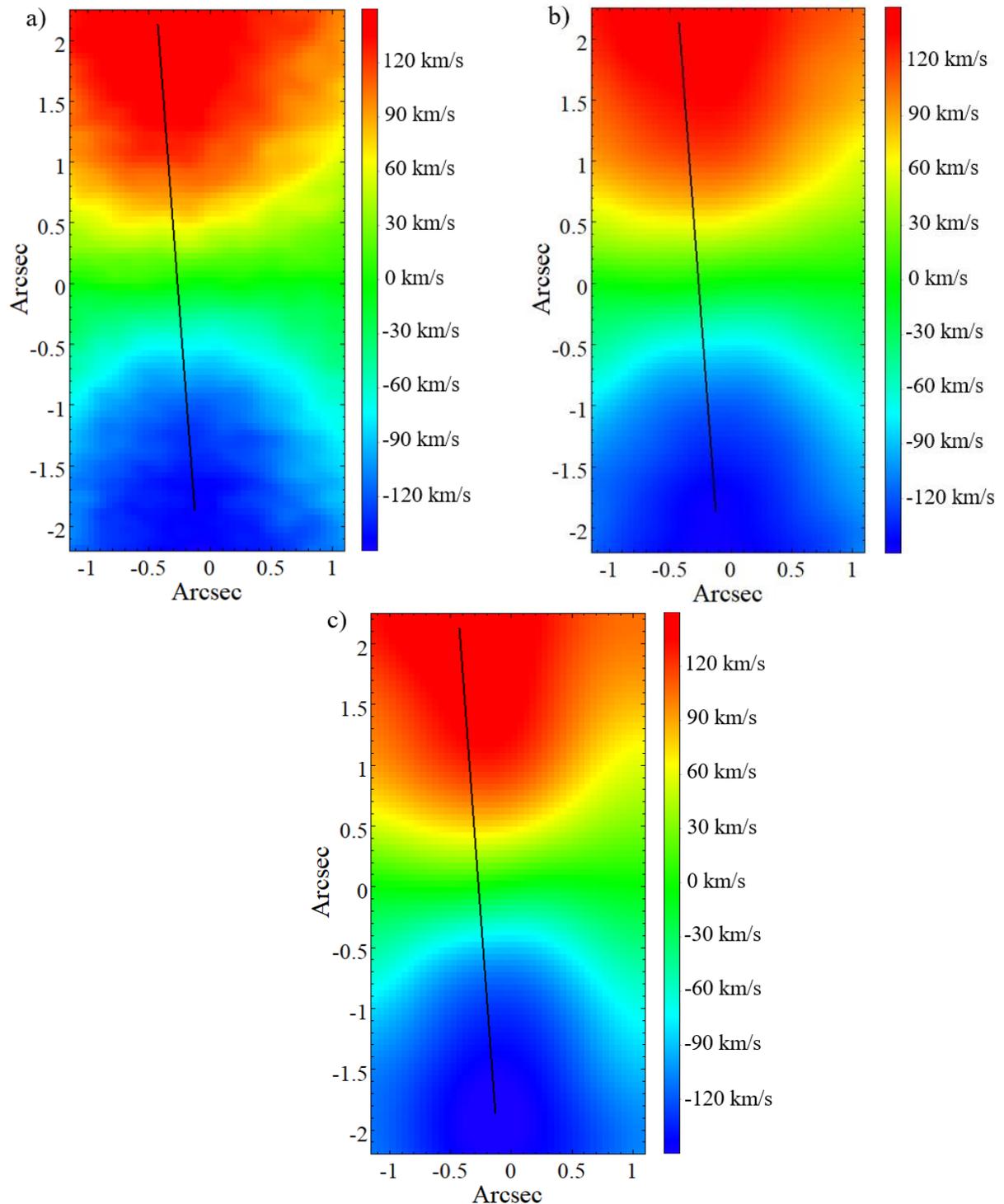


Figura 3 – Mapas da velocidade radial estelar, relativa ao SMBH central, com seu eixo cinemático (reta preta), no cubo bruto (a), cubo filtrado (b) e cubo deconvoluído (c).



A obtenção dos mapas de velocidade estelar de cada cubo nos permitiu determinar a massa do SMBH. Para isso, primeiramente, foi necessário obter o perfil de brilho estelar de NGC 3115, o qual foi determinado aplicando-se o procedimento *Multi-Gaussian Expansion* – MGE (Cappellari 2002) a uma imagem desse objeto obtida com o *Hubble Space Telescope* (HST), com o filtro F814W (aproximadamente equivalente ao filtro da banda I). Vale ressaltar que o MGE ajusta a imagem de uma galáxia com uma soma de gaussianas bidimensionais. Em seguida, foi executado o método de Jeans, que modela o potencial gravitacional e reproduz a cinemática estelar ou do gás nos arredores do SMBH, utilizando a solução das equações de Jeans, direcionadas a lidar com cinco parâmetros livres: a razão massa-

luminosidade ( $M/L$ , que é considerada constante no modelo) das populações estelares ao redor do SMBH, a massa do SMBH ( $M_{BH}$ ), a inclinação (em relação à linha de visada) do disco de estrelas em rotação ao redor do SMBH ( $i$ ), a anisotropia radial ( $\beta$ ) das gaussianas utilizadas no ajuste com o MGE; a anisotropia tangencial ( $\gamma$ ) das gaussianas utilizadas no ajuste com o MGE. Nesse método, os cinco parâmetros são alterados repetidas vezes, gerando diversos mapas de velocidade simulados. O processo se encerra quando é alcançada uma proximidade satisfatória entre os mapas observado e simulado. Essa proximidade é dada numericamente pelo  $\chi^2$ , seu menor valor corresponde ao  $\chi^2_{\min}$  (quanto menor o valor de  $\chi^2$ , mais próximos estão os mapas observado e simulado).

Por último, foi calculada a incerteza da massa do SMBH obtida para cada um dos cubos de dados analisados, seguindo o procedimento descrito em de Rosa et al. (2011). Selecionaram-se as simulações cujos valores de  $\chi^2$  satisfaziam  $\chi^2 - \chi^2_{\min} < 1$ . Construiu-se, apenas com as simulações selecionadas, um histograma com os valores das massas do SMBH. Ajustou-se então uma gaussiana ao histograma e o valor  $\sigma$  da gaussiana obtida foi tomado como a incerteza da massa do SMBH.

## Resultados e Discussão

A partir de cada etapa da pesquisa, foram sendo obtidos diversos mapas e gráficos de vários parâmetros da região estudada. Primeiramente, como mencionado anteriormente, após a aplicação do método pPXF a cada cubo, foram obtidos os mapas da dispersão de velocidades estelar, apresentados na Figura 2, e os mapas da velocidade radial estelar, Figura 3. No caso dos mapas de velocidade estelar, os valores foram determinados de forma que a velocidade, na posição correspondente ao SMBH (que coincide com a do núcleo estelar), fosse igual a zero. Em outras palavras, são mostradas as velocidades radiais relativas ao SMBH central. A partir das posições correspondentes aos valores mínimo e máximo dos mapas de velocidades, foi determinado um eixo cinemático (passando por essas duas posições), a partir do qual foi extraída uma curva de valores de cada um dos mapas. Essas curvas podem ser vistas na Figura 4, 5 e 6, sendo elas dos mapas do cubo bruto, filtrado e deconvoluído, sobrepostas pelas dos mapas correspondentes às melhores simulações obtidas, respectivamente.

Para efeito de comparação, na Figura 7, 8 e 9 são observados os mapas de cada cubo ao lado dos de melhor simulação, todos com a curva cinemática; mostrando visualmente a grande similaridade entre eles.

Com as massas obtidas dos mapas da velocidade radial estelar simulados, gerados pelo método de Jeans, foram construídos três histogramas da distribuição das massas, sobrepostos por uma curva gaussiana. A Figura 10 é o histograma do cubo bruto, Figura 11 do cubo filtrado e Figura 12 do cubo deconvoluído.

Por fim, foi feita a Tabela 1, apresentando os valores da massa e incerteza do SMBH para cada etapa do método. O relevante nesses dados são valores de incerteza, que estão decrescendo significativamente conforme o decorrer da aplicação do tratamento.

Figura 4 – Curvas cinemáticas do cubo bruto, sendo uma do mapa de velocidade observado (círculo laranja), com incerteza, e outra do mapa obtido com a melhor simulação (curva azul claro).

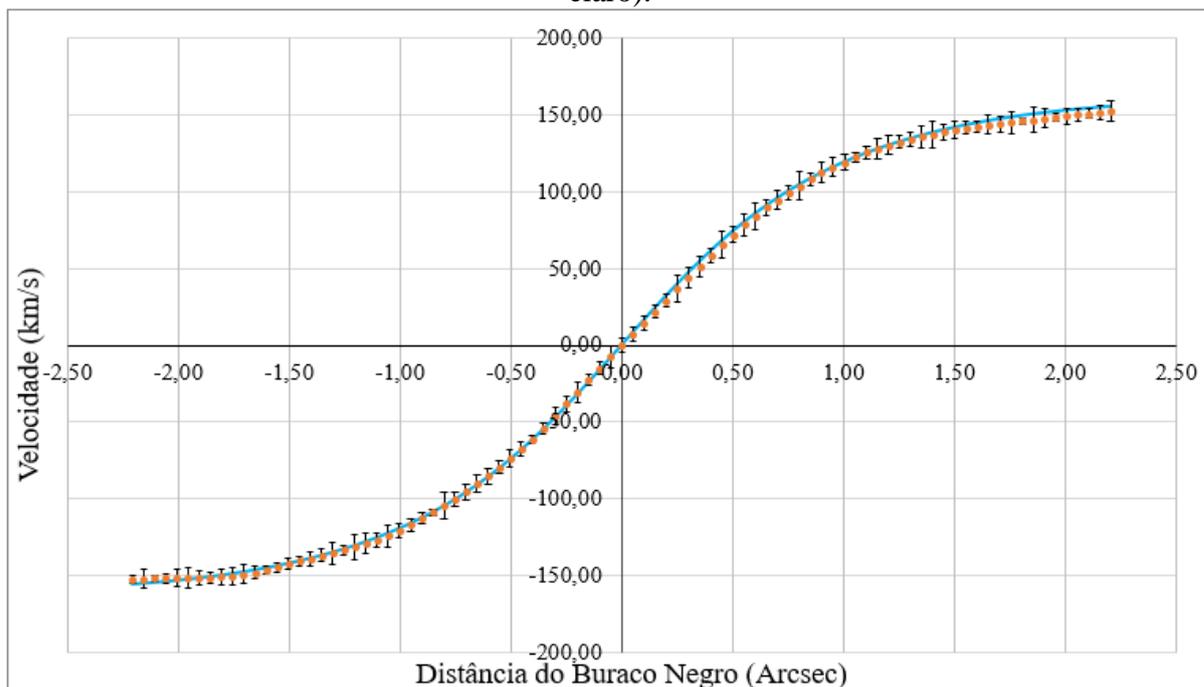


Figura 5 – Curvas cinemáticas do cubo filtrado, sendo uma do mapa de velocidade observado (círculo verde), com incerteza, e outra do mapa obtido com a melhor simulação (curva laranja claro).

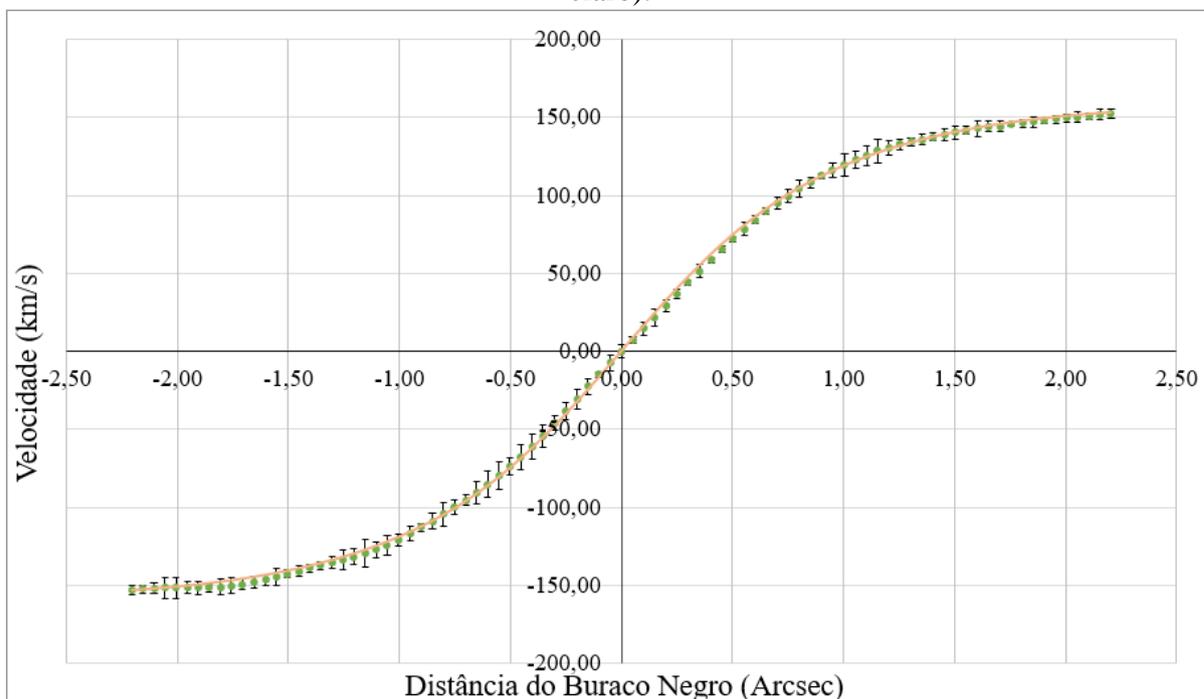


Figura 6 – Curvas cinemáticas do cubo deconvoluído, sendo uma do mapa de velocidade observado (círculo azul), com incerteza, e outra do mapa obtido com a melhor simulação (curva verde claro).

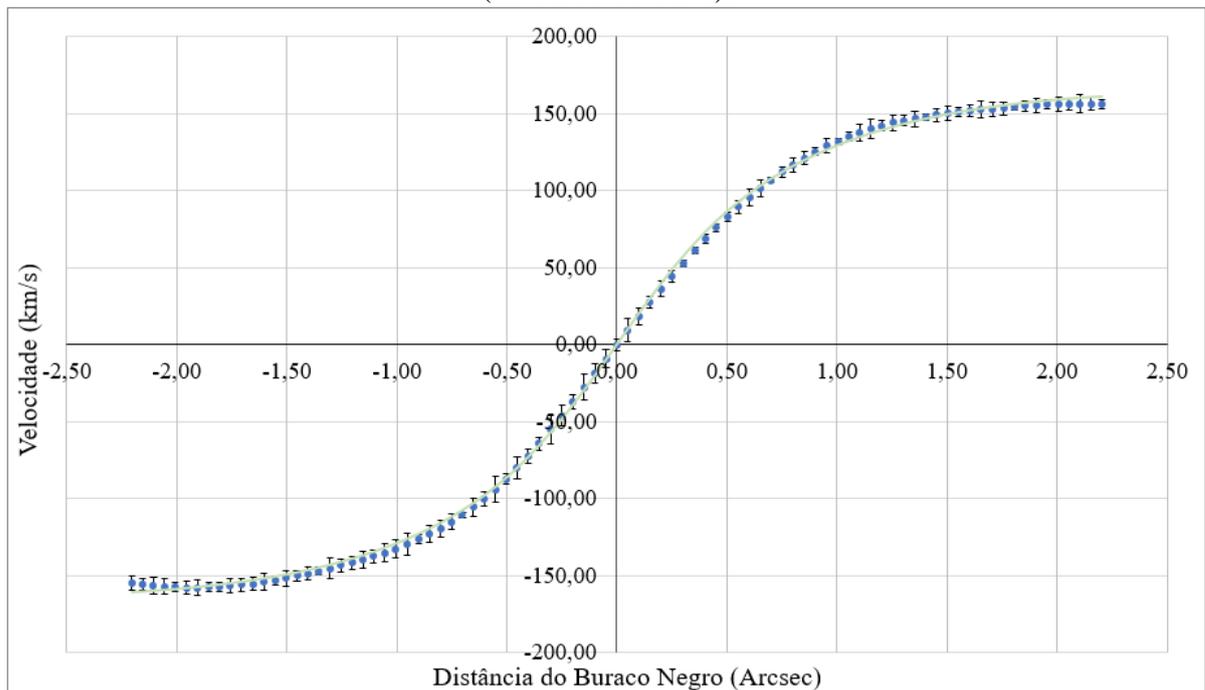


Figura 7 – Mapas da velocidade radial estelar, com seu eixo cinemático (reta preta), observado (esquerda) e obtido com a melhor simulação (direita), do cubo bruto.

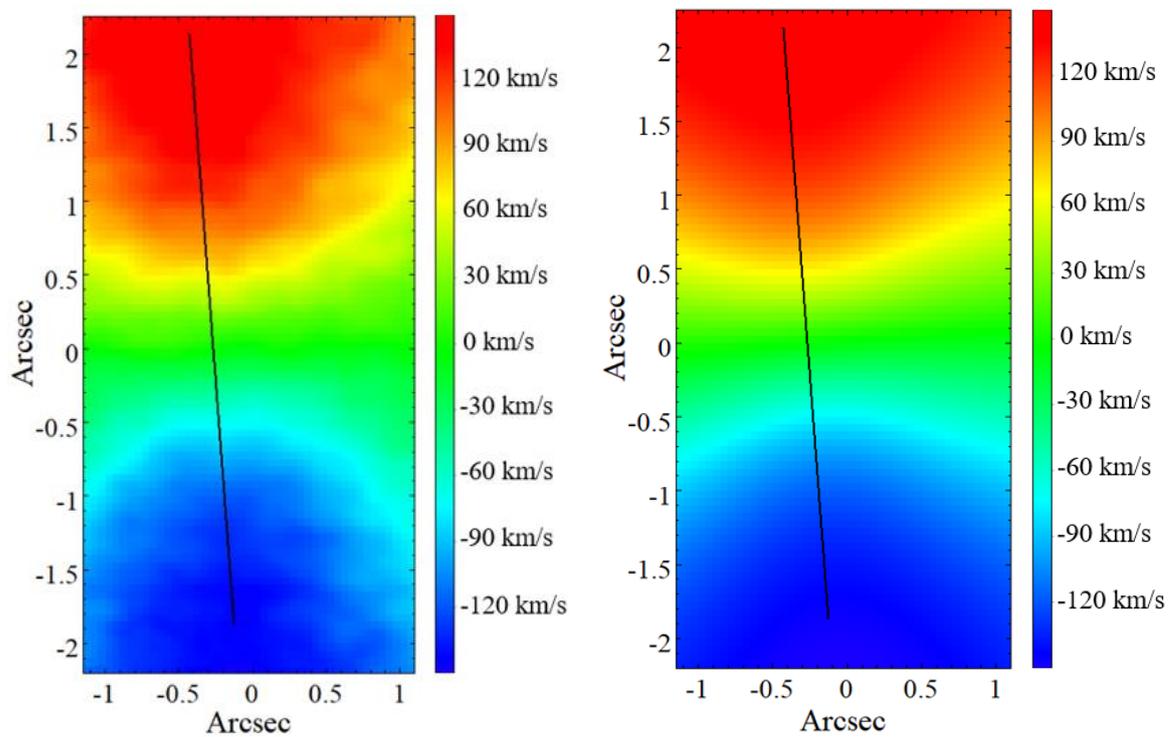


Figura 8 – Mapas da velocidade radial estelar, com seu eixo cinemático (reta preta), observado (esquerda) e obtido com a melhor simulação (direita), do cubo filtrado.

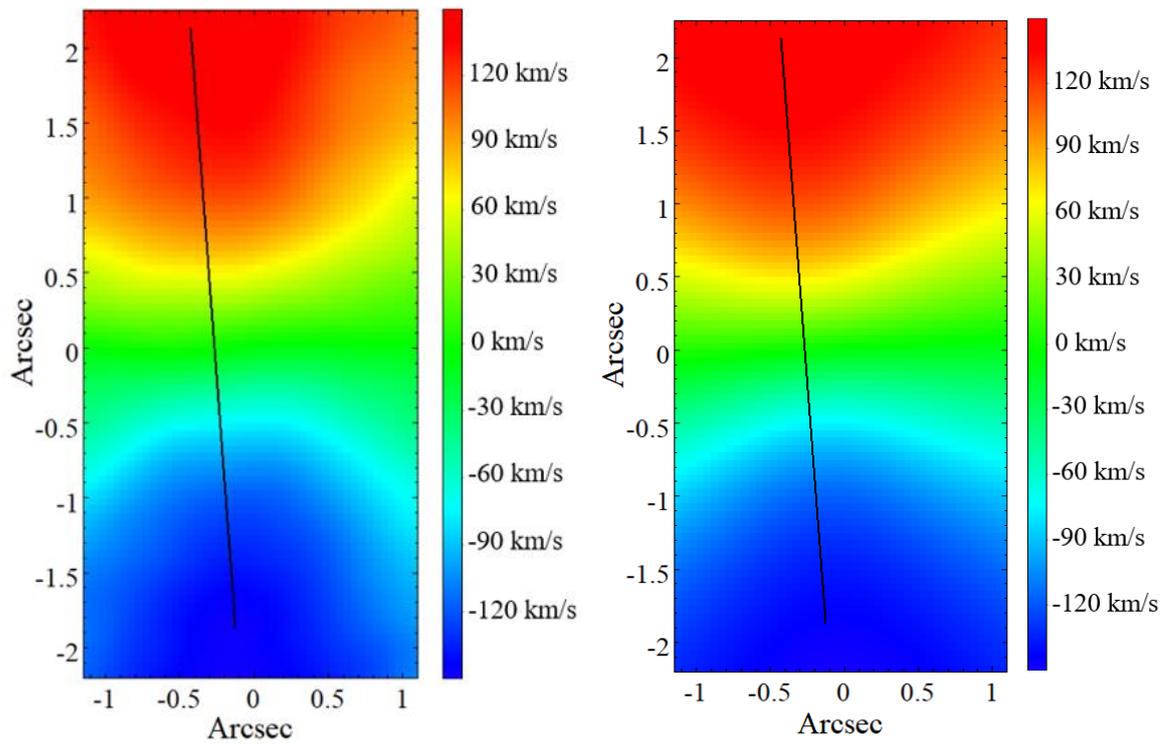


Figura 9 – Mapas da velocidade radial estelar, com seu eixo cinemático (reta preta), observado (esquerda) e obtido com a melhor simulação (direita), do cubo deconvoluído.

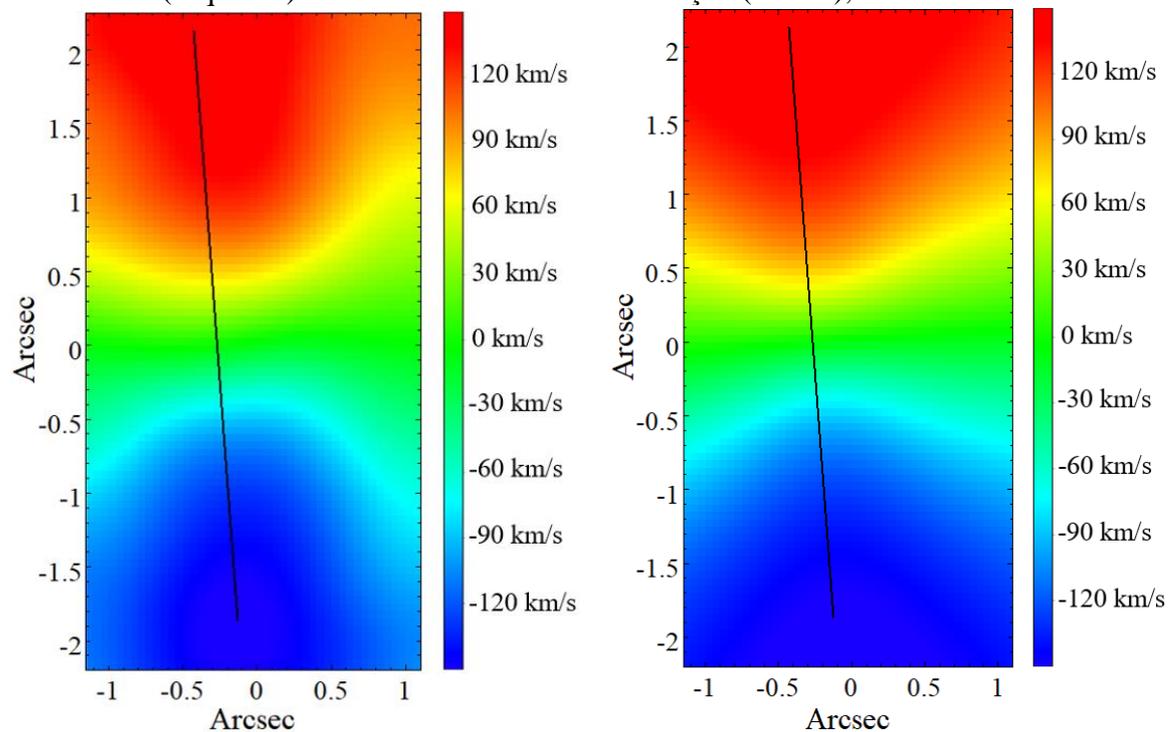


Figura 10 – Histograma representando a frequência da massa do buraco negro do cubo bruto, para os casos em que  $\chi^2 - \chi^2_{\min} < 1$ , com a curva gaussiana ajustada sobreposta.

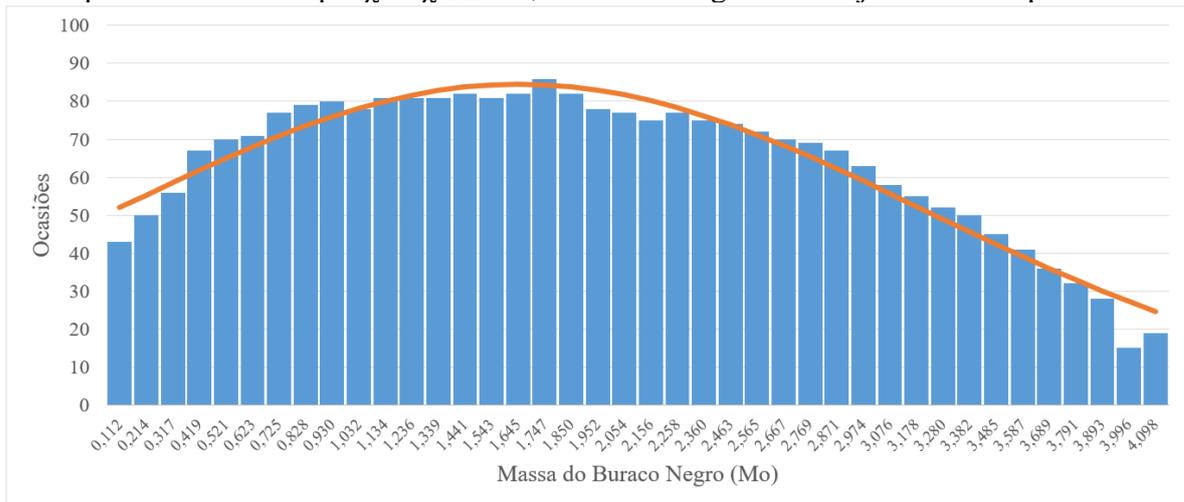


Figura 11 – Histograma representando a frequência da massa do buraco negro do cubo filtrado, para os casos em que  $\chi^2 - \chi^2_{\min} < 1$ , com a curva gaussiana ajustada sobreposta.

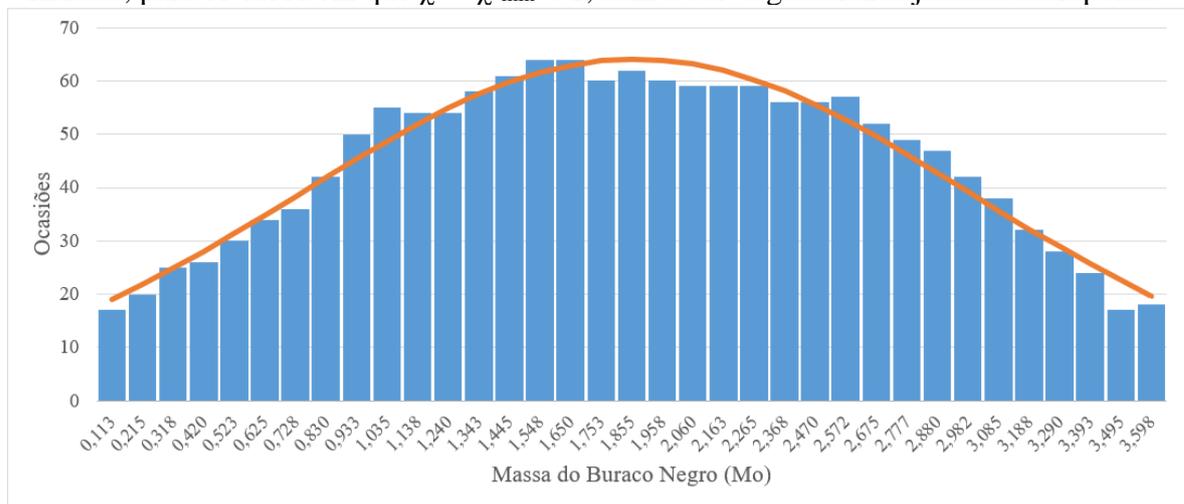


Figura 12 – Histograma representando a frequência da massa do buraco negro do cubo deconvoluído, para os casos em que  $\chi^2 - \chi^2_{\min} < 1$ , com a curva gaussiana ajustada sobreposta.

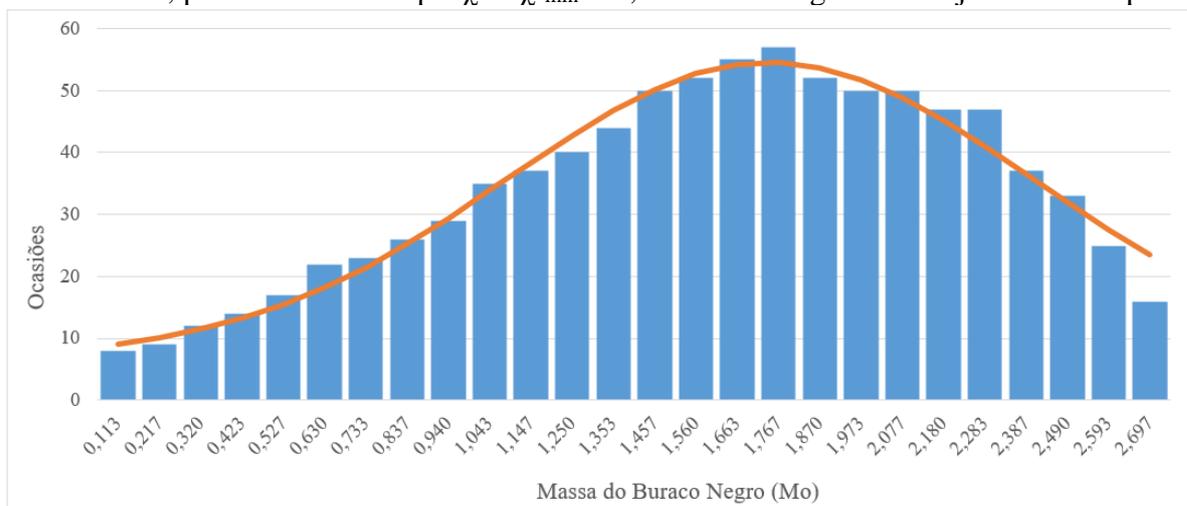


Tabela 1 – Massa do SMBH central de NGC 3115 (em massas solares –  $M_{\odot}$ ) obtida com cada um dos cubos, com suas respectivas incertezas.

Cubo	Massa ( $M_{\odot}$ )	Incerteza ( $M_{\odot}$ )
Bruto	$1.0 \times 10^8$	$\pm 1.5 \times 10^8$
Filtrado	$1.2 \times 10^8$	$\pm 1.1 \times 10^8$
Deconvoluído	$1.1 \times 10^8$	$\pm 0.7 \times 10^8$

## Conclusões

A implementação da metodologia de tratamento de dados, desenvolvida pelo IAG, se mostrou eficaz na análise da cinemática estelar na região central da galáxia NGC 3115, apresentando benefícios perceptíveis, sem quaisquer prejuízos observados nos dados. Isso pode ser notado pelo fato de que os valores obtidos para a massa do SMBH nos cubos bruto, filtrado e deconvoluído foram todas compatíveis, dentro das incertezas, mas houve uma nítida redução dessas incertezas decorrente da aplicação do tratamento. Comparando-se os cubos deconvoluído e bruto, pode-se concluir que a incerteza da massa do SMBH obtida após o tratamento de dados é cerca de 47% do valor encontrado sem o tratamento. Boa parte dessa redução na incerteza é devida à melhoria na resolução espacial da observação proporcionada pela aplicação da deconvolução de Richardson-Lucy. Por outro lado, também foi observada uma redução na incerteza da massa do SMBH devida à aplicação da filtragem espacial de Butterworth (cubo filtrado). Nesse caso, tal incerteza é cerca de 72% do valor obtido sem a aplicação da filtragem. Esse resultado pode ser considerado mais inesperado, já que acreditávamos que a simples remoção de ruído de alta frequência do cubo de dados não proporcionaria uma redução tão significativa na incerteza da massa do SMBH. Considerando a importância da determinação de massas de SMBHs em estudos de formação e evolução de galáxias e as melhorias proporcionadas pela metodologia de tratamento proposta, os resultados aqui obtidos deverão ser de grande utilidade para a comunidade astronômica.

## Referências Bibliográficas

- Cappellari, M. 2002, *Efficient multi-Gaussian expansion of galaxies*, MNRAS, 333, 400.
- Cappellari, M. & Emsellem, E. 2004, *Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood*, PASP, 116, 138.
- Cappellari, M. 2008, *Measuring the inclination and mass-to-light ratio of axisymmetric galaxies via anisotropic Jeans models of stellar kinematics*, MNRAS, 390, 71.
- de Rosa, G., Decarli, R., Walter, F., Fan, X., Jiang, L., et al. 2011, *Evidence for non-evolving Fe II/Mg II ratios in rapidly accreting  $z \sim 6$  QSOs*, ApJ, 739, 56.
- Gonzalez, R. C. & Woods, R. E. 2002, *Digital Image Processing*.
- Lucy, L. B. 1974, *An iterative technique for the rectification of observed distributions*, AJ, 79, 745.
- Menezes, R. B., Ricci, T. V., Steiner, J. E., da Silva, P., Ferrari, F. & Borges, B. W. 2019, *A treatment procedure for GMOS/IFU data cubes: application to NGC 2835*, MNRAS, 483, 700
- Richardson, W. H. 1972, *Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration*, JOSA, 62, 55.
- Sánchez-Blázquez, P., Peletier, R. F., Jiménez-Vicente, J., Cardiel, N., Cenarro, A. J., et al. 2006, *Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra*, MNRAS, 371, 703.