

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Ingrid dos Santos Beloto

Análise de galáxias por meio de ajustes de Distribuição Espectral de Energia

São Paulo

2021

Ingrid dos Santos Beloto

Análise de galáxias por meio de ajustes de Distribuição Espectral de Energia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Paula Rodrigues Tei-
xeira Coelho (IAG-USP)

São Paulo

2021

Agradecimentos

À Deus por ter feito grandiosas coisas no Universo e por me proporcionar o prazer e a benção de poder estudar suas criações, além de ter sido meu refúgio e sustento nas horas difíceis da graduação;

À minha família por desde sempre terem me apoiado nos estudos e a seguir o meu sonho de me tornar astrônoma;

Ao meu companheiro Guilherme, que me ajudou nas dificuldades e estava ao meu lado nas felicidades. A graduação ao seu lado se tornou um dos melhores momentos da vida;

À minha orientadora Paula Coelho, que desde o início sempre foi muito atenciosa e me deu todo o suporte e aprendizado para a realização deste projeto;

Aos colegas: Willian Yuuiti e Rafael Hideki. Se eu estou aqui hoje realizando este trabalho, é por conta de vocês. Também aos que fizeram parte dessa jornada desde o começo e enriqueceram minha caminhada com risadas e alegria: Melissa, Carolina, Lucas Degi, Ricardo, Pedro Ticiani, Kayleigh, Fernanda, Giovani, Vinicius, todos os amigos do Observatório Abrahão de Moraes e da atlética Gleb Wataghin, entre muitos outros;

Aos Professores da graduação, em especial o professor Ramachrisna Teixeira. Admiro sua paixão e didática ao ensinar Astronomia, e seu suporte sempre foi essencial;

À USP por toda a vivência que me proporcionou, me dando os melhores anos da minha vida. Ao IAG que sempre foi como uma família, e ao Observatório Abrahão de Moraes, o melhor refúgio onde meu coração encontra conforto.

“O que de fato é mais belo do que o céu, que naturalmente contém todas as coisas belas?”

Nicolau Copérnico

*“Só ele estende os céus e anda sobre as ondas do mar. Ele é o Criador da Ursa e do
Órion, das Plêiades e das constelações do sul.”*

Jó 9:8-9 NVI

Resumo

Sabe-se que no estudo de galáxias é muito importante examinar quais são as populações estelares que as constituem. O objetivo deste projeto é analisar a formação e evolução de galáxias da Nuvem Azul através do estudo de suas populações estelares. Parâmetros são extraídos de sua distribuição espectral de energia (SED do inglês *Spectral Energy Distribution*), por meio de códigos de ajuste. Este método foi aplicado a uma amostra de dados fotométricos do levantamento astronômico *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) contendo galáxias com formação estelar da região *Stripe 82*. Utilizou-se o código *Code Investigating GALaxy Emission* (CIGALE) para obter os parâmetros desejados da amostra e fazer uma análise mais detalhada sobre este grupo. Além disso, o código foi empregado com diferentes configurações de entrada, com o intuito de compreender como a alteração das entradas pré-selecionadas, como a história de formação estelar, modelos de populações estelares simples e de atenuação por poeira, poderiam afetar os resultados. Como resultado utilizando a configuração padrão (com a parametrização de história de formação estelar denominada “atrasada”, atenuação por poeira dada pela lei de potências e o modelo de população estelar de Bruzual & Charlot (2003)) os valores medianos obtidos foram: idade de $6.02^{+2.09}_{-3.53}$ Ganos, metalicidade (fração de massa Z) de $0.014^{+0.004}_{-0.003}$, massa estelar de $(3.04^{+9.68}_{-2.54})10^{10}M_{\odot}$, massa do gás de $(0.97^{+3.38}_{-0.83})10^{10}M_{\odot}$ e luminosidade de $(2.66^{+4.64}_{-1.72})10^{37}$ W. Conclui-se ainda que a alteração da parametrização de função de massa inicial utilizada não teve impacto considerável no resultado da amostra, e os valores de massa estelar e massa do gás da galáxia são pouco alterados, mas parâmetros como idade, metalicidade e luminosidade podem ter uma grande variação dependendo da configuração de entrada escolhida previamente.

Palavras-chave: Galáxias: conteúdo estelar, ajuste de SED, Astronomia extragaláctica, Método: análise de dados, Técnica: fotométrica, Galáxias: evolução.

Abstract

It is known that in the study of galaxies it is very important to examine which stellar populations constitute them. The aim of this project is to analyze the formation and evolution of Blue Cloud galaxies through the study of their stellar populations. Parameters are extracted from their Spectral Energy Distribution (SED), by means of fitting codes. This method was applied to a sample of photometric data from the astronomical Sloan Digital Sky Survey (SDSS) containing star-forming galaxies from the Stripe 82 region. The Code Investigating GALaxy Emission (CIGALE) was used to obtain the desired parameters of the sample and carry out a more detailed analysis of this group. In addition, the code was used with different input configurations, in order to understand how changing pre-selected models, such as star formation history, simple stellar population and dust attenuation models, could affect the output data. As a result, using the default configuration (with the parameterization of the star formation history called “delayed”, dust attenuation given by the power law and the simple stellar population model of Bruzual & Charlot (2003)) the average values obtained were: age of $6.02^{+2.09}_{-3.53}$ Gyears, metallicity (mass fraction Z) of $0.014^{+0.004}_{-0.003}$, stellar mass of $(3.04^{+9.68}_{-2.54})10^{10} M_{\odot}$, gas mass of $(0.97^{+3.38}_{-0.83})10^{10} M_{\odot}$ and luminosity of $(2.66^{+4.64}_{-1.72})10^{37}$ W. It is also concluded that the change in the adopted initial mass function models had no considerable impact on the sample result, and the values of stellar mass and gas mass of the galaxy are little changed, but parameters such as age, metallicity and luminosity may have a great variation depending on the model chosen previously.

Keywords: Galaxies: stellar content, SED fitting, Extragalactic Astronomy, Method: data analysis, Technique: photometric, Galaxies: evolution.

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de ajuste de SED.	18
2.1	Histograma da razão sinal-ruído na banda r da amostra utilizada.	21
2.2	Distribuição de probabilidade dos dados nas bandas ugriz	22
2.3	Distribuição de probabilidade do <i>redshift</i> dos dados.	22
2.4	Diagrama Cor-Cor da amostra.	23
2.5	Diagrama Cor-Magnitude da amostra, e a divisão entre <i>Blue Cloud</i> , <i>Green Valley</i> e <i>Red Sequence</i>	24
2.6	Diagrama Cor-Magnitude da amostra, com destaque para as 15 galáxias escolhidas	24
3.1	Exemplo do ajuste da SED utilizando o código CIGALE.	28
3.2	Módulos de História de Formação Estelar presentes no código CIGALE. . .	30
4.1	Distribuição dos resultados de cada configuração	35
4.2	Gráficos comparativos dos parâmetros de idade da população estelar principal da galáxia encontrados para cada configuração.	37
4.3	Gráficos comparativos dos parâmetros de metalicidade encontrados para cada configuração.	38
4.4	Gráficos comparativos dos parâmetros de luminosidade estelar encontrados para cada configuração.	39
5.1	Gráficos comparativos dos resultados utilizando a configuração II.	42
D.1	SEDs ajustadas para as galáxias do grupo “ <i>Red Sequence</i> ”.	65
D.2	SEDs ajustadas para as galáxias do grupo “ <i>Green Valley</i> ”.	66

D.3	SEDs ajustadas para as galáxias do grupo “ <i>Blue Cloud</i> ”	67
E.1	Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração I.	69
E.2	Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração II.	70
E.3	Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração III.	71
E.4	Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração IV.	72
E.5	Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração V.	73
E.6	Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração VI.	74
F.1	Gráficos comparativos dos parâmetros de massa estelar encontrados para cada configuração.	75
F.2	Gráficos comparativos dos parâmetros de massa do gás encontrados para cada configuração.	76

Lista de Tabelas

2.1	Características das bandas ugriz	20
2.2	ID, coordenadas e cor das 15 galáxias escolhidas	25
4.1	Parâmetros encontrados para as galáxias escolhidas.	33
4.2	Valores medianos dos resultados de cada configuração.	36

Sumário

1. Introdução	17
2. Base de dados	19
2.1 Aquisição dos dados	19
2.2 Seleção e tratamento dos dados	20
2.3 Análise exploratória dos dados	21
3. Metodologia	27
3.1 CIGALE	27
3.2 Parâmetros de entrada	29
4. Resultados	33
4.1 Subamostra de teste	33
4.2 Análise das galáxias da Nuvem Azul	34
4.3 Impacto das diferentes configurações nos parâmetros de população estelar .	36
5. Discussão	41
5.1 A população estelar das galáxias azuis	41
5.2 Impacto da escolha da IMF	41
5.3 Impacto da escolha do modelo de atenuação por poeira	42
5.4 Metalicidade	42
5.5 Massas	43
5.6 Idade	43
6. Conclusões	45

<i>Referências</i>	47
<i>Apêndice</i>	49
<i>A. Código SQL</i>	51
<i>B. Código com parâmetros de entrada utilizados no CIGALE</i>	53
<i>C. Parâmetros de entrada utilizados no CIGALE para a avaliação final</i>	61
<i>D. SEDs ajustadas para a pequena amostra de 15 galáxias</i>	65
<i>E. Gráficos dos parâmetros de saída de cada configuração</i>	69
<i>F. Gráficos de comparação dos parâmetros de massa estelar e do gás de cada configuração.</i>	75

Introdução

A técnica de ajuste de distribuição espectral de energia (SED do inglês *Spectral Energy Distribution*) de galáxias é uma ferramenta que vem sendo utilizada cada vez mais na Astronomia Extragaláctica (Walcher et al., 2011; Conroy, 2013). Mas em se tratando de galáxias, temos muitas propriedades envolvidas como idade, metalicidade e massa das estrelas que podem variar de acordo com as populações que as compõem.

Cada um desses parâmetros físicos são registrados no espectro das galáxias em determinados comprimentos de onda, de modo que fazendo-se uma análise de tais SEDs pode-se caracterizar a história evolutiva dessas galáxias.

Através disso, muitos modelos de Populações Estelares Simples (SSPs do inglês *Simple Stellar Populations*) vêm sendo criados (como por exemplo Bruzual & Charlot, 2003; Maraston, 2005; Coelho et al., 2007; Vazdekis et al., 2016) com o intuito de poder extrair as informações das SEDs. O grande avanço dos telescópios tem ajudado cada vez mais tais estudos, pois os novos levantamentos do céu nos permitem observar as SEDs com mais detalhe e em mais comprimentos de onda.

A técnica de ajuste de SED consiste em utilizar um código que compara modelos teóricos de populações estelares com as observações. Cada código considera diferentes hipóteses sobre a história de formação estelar (podendo ser paramétrica ou não paramétrica) e diferentes modelos de SSPs. Por conta disso, há uma grande variedade de códigos de ajustes de SEDs disponíveis, que predispõem de modelos, filtros e análises estatísticas diferentes (veja o site *Fitting the SEDs of galaxies*¹). Um exemplo do ajuste de SED pode ser encontrado na Figura 1.1.

¹ <http://www.sedfitting.org/>

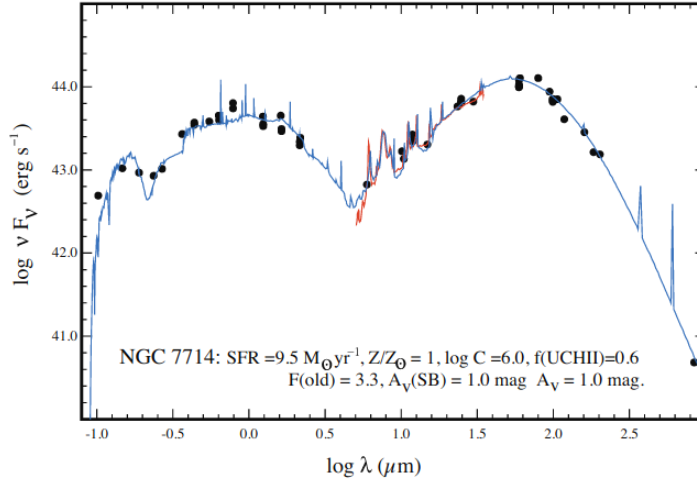


Figura 1.1: Exemplo de ajuste do modelo de Groves et al. (2008) na SED da galáxia *starburst* NGC 7714, onde os pontos pretos são os fluxos observados e a linha azul a curva ajustada. Figura 5 de Walcher et al. (2011).

Existem vários métodos de análise do ajuste, alguns exemplos são: parametrização de modelos de SED (Iglesias-Páramo et al., 2007); índices espectrais (Kauffmann et al., 2003); análise da principal componente (PCA do inglês *Principal Component Analysis*, Budavári et al., 2009); ajuste espectral por inversão (Cid Fernandes et al., 2005) e inferência Bayesiana (Boquien et al., 2018).

O intuito deste projeto é estudar as populações estelares de uma amostra de galáxias da Nuvem Azul através de suas SEDs e verificar qual o impacto de diferentes hipóteses no processo de ajuste nos resultados que obtemos. A primeira fase do projeto teve como objetivo o estudo dos códigos e modelos, aplicando-os em uma pequena amostra com 15 galáxias de dados públicos. Por fim, aplica-se o código escolhido sobre as galáxias azuis e é feita uma análise mais detalhada em relação a este grupo e as configurações iniciais utilizadas.

Neste trabalho apresenta-se a aquisição, tratamento e a exploração dos dados utilizados no Capítulo 2, a metodologia aplicada e os parâmetros previamente estipulados no Capítulo 3, os resultados obtidos para cada fase do projeto no Capítulo 4, discussão e análise dos resultados no Capítulo 5 e as conclusões no Capítulo 6.

Base de dados

O primeiro passo deste projeto foi obter dados fotométricos de uma amostra de galáxias. Optando por utilizar magnitudes já tratadas em questão de extinção, foi escolhido o banco de dados do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). As seções seguintes abordarão sobre a aquisição, seleção, tratamento e análise dos dados obtidos.

2.1 Aquisição dos dados

Utilizou-se dados fotométricos de uma amostra com 21541 galáxias obtidos a partir da 16^a liberação de dados do levantamento astronômico SDSS (Ahumada et al., 2020) da região *Stripe* 82. Essa região é bastante estudada pelos astrônomos e está localizada no equador celeste, com ascensão reta entre $-50^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ e declinação entre $-1.25^\circ \leq \delta \leq 1.25^\circ$ em coordenadas J2000. A amostra foi adquirida utilizando uma solicitação de dados com um código em linguagem SQL (linguagem de consulta estruturada do inglês *Structured Query Language*) no site **CasJobs**¹. O código está disponível no Apêndice A. Os dados foram limitados da seguinte maneira:

- Ascensão reta (α) nos intervalos $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ e $310^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$;
- declinação (δ) entre $-1.25^\circ \leq \delta \leq 1.25^\circ$;
- *redshift* (z) no intervalo $0.005 \leq z \leq 0.1$;
- avermelhamento das magnitudes na banda **r** em **dere_dr** ≤ 22 ;
- objetos sem fotometria limpa foram descartados (isto é, objetos duplicados, com píxeis saturados ou problemas substanciais de interpolação da banda **r**);

¹ <http://skyserver.sdss.org/CasJobs/>

- probabilidade nula de ser estrela.

A seleção do avermelhamento na banda **r** é devida ao limite de sensibilidade do SDSS. O limite inferior de *redshifts* foi aplicado para remover objetos muito próximos, e o superior é equivalente ao *redshift* máximo da amostra principal de galáxia do SDSS.

O sistema fotométrico **ugriz** utilizado nos dados do SDSS é o sistema de magnitudes AB (Oke & Gunn, 1983). Temos a seguinte relação entre magnitude e fluxo:

$$m - m_0 = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right), \quad (2.1)$$

onde os valores com subscrito 0 referem-se a uma estrela padrão de referência. O sistema AB é definido de modo que um objeto de magnitude zero tenha um fluxo $f_{0,\nu} = 3631$ Jy (Janskys; $1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). Substituindo tais valores na Equação 2.1, obtém-se:

$$m_{AB} = -2.5 \log_{10}(f_\nu) + 8.90, \quad (2.2)$$

onde a Equação 2.2 nos dá a magnitude no sistema AB.

Os comprimentos de onda e as larguras de cada banda estão expostos na Tabela 2.1.

*Tabela 2.1 - Características das bandas **ugriz**.*

Filtro	u	g	r	i	z
λ central (nm)	358	490	626	767	907
Largura da banda (nm)	64	135	137	154	147

2.2 Seleção e tratamento dos dados

Após a aquisição dos dados, outra seleção da amostra foi feita através de um código na linguagem computacional **python**, escolhendo apenas os dados com razão sinal-ruído $S/N > 20$ para a banda **u** e $S/N > 50$ para as outras bandas (**griz**), obtendo-se 5561 galáxias. O histograma da razão sinal-ruído na banda *r* da amostra antes da seleção encontra-se na Figura 2.1.

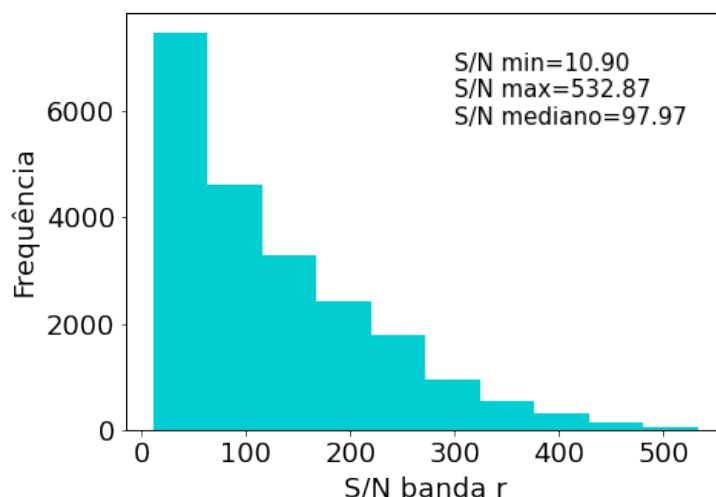


Figura 2.1: Histograma da razão sinal-ruído na banda r dos objetos, ilustrando a importância em refinar a amostra adotando o corte em $S/N > 50$.

Além disso, as magnitudes obtidas já estão corrigidas do efeito de extinção, e sobre estas foram aplicados os *offsets* (Doi et al., 2010), isto é, a correção para o desgaste dos detectores do SDSS, efeito do envelhecimento que é consistente com a variação da sensibilidade instrumental. Este efeito impacta especialmente a banda u , com uma correção de -0.04 mag.

Através das magnitudes corrigidas, pôde-se encontrar os fluxos f_ν [Jy] utilizando a Equação 2.2. Este fluxo é utilizado como dado de entrada para o código de ajuste (veja o Capítulo 3).

2.3 Análise exploratória dos dados

Com o objetivo de caracterizar a amostra de objetos selecionados, confecciona-se histogramas, gráficos de densidade e diagramas Cor-Magnitude e Cor-Cor da amostra. O gráfico de densidade é uma variação do histograma que usa a estimativa de densidade Kernel, técnica estatística que estima uma função de distribuição de probabilidade através da média ponderada dos dados, de modo que os pontos mais próximos têm pesos maiores.

Neste trabalho a densidade é calculada em `python` importando a função `kde` da biblioteca `scipy.stats`, e os gráficos são elaborados através da biblioteca `seaborn` utilizando a função `seaborn.displot`. A distribuição dos dados em relação às magnitudes absolutas estão apresentadas na Figura 2.2, e em relação ao *redshift* fotométrico na Figura 2.3.

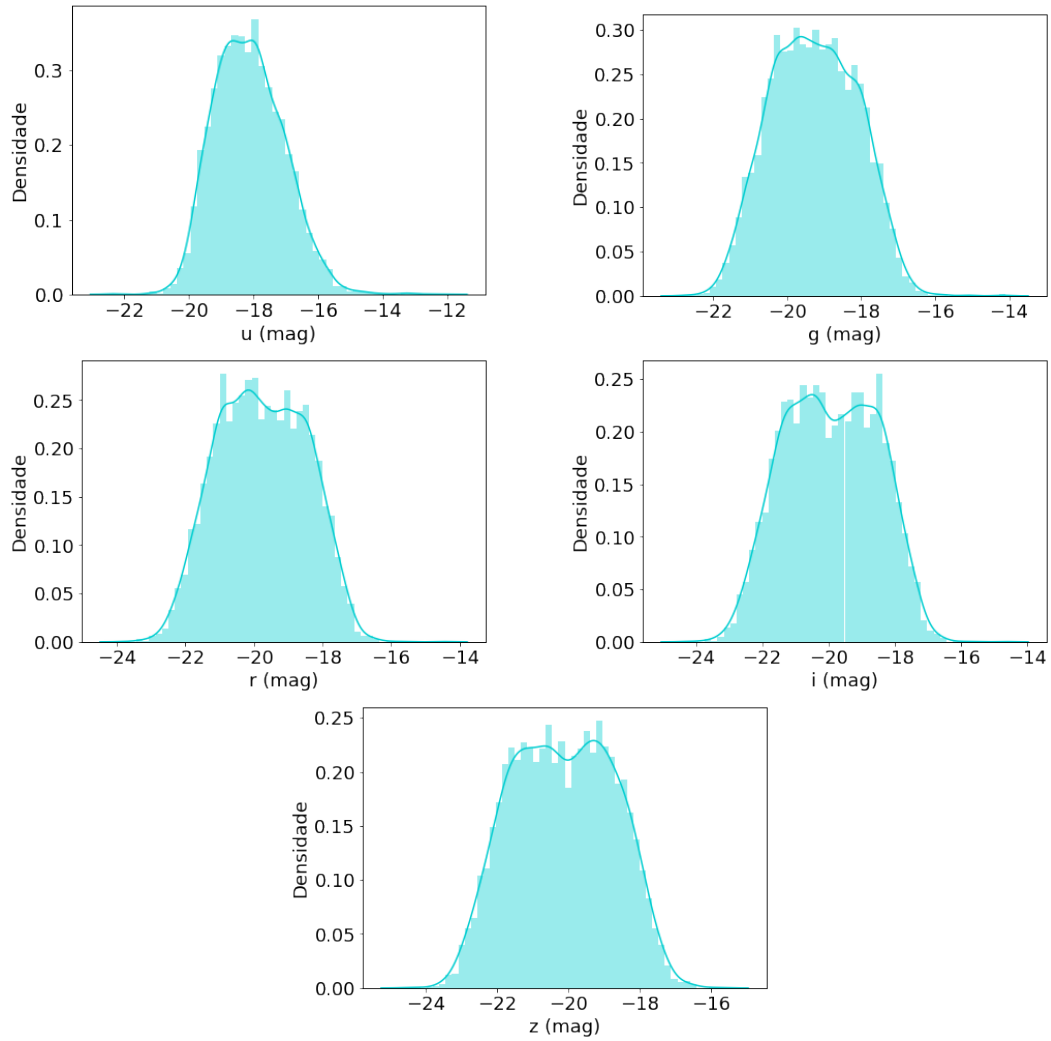


Figura 2.2: Distribuição de probabilidade dos dados nas bandas **ugriz** (magnitudes absolutas).

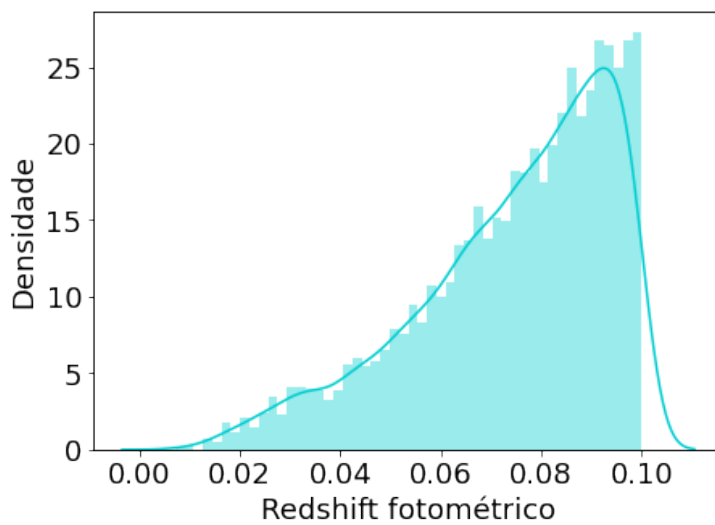


Figura 2.3: Distribuição de probabilidade do *redshift* dos dados.

Por fim, pôde-se elaborar gráficos com o objetivo de analisar a distribuição de cores das galáxias escolhidas, por meio de diagramas Cor-Cor que estão apresentados na Figura 2.4.

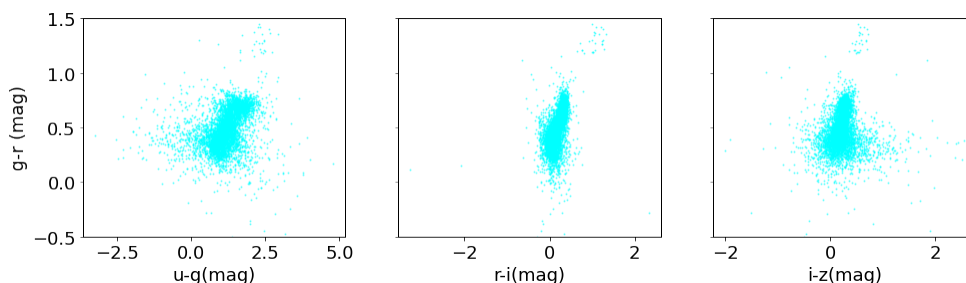


Figura 2.4: Diagrama Cor-Cor da amostra (magnitudes absolutas).

O diagrama de Cor-Magnitude (Figura 2.5) possibilitou identificar a divisão das famílias das galáxias, sendo elas vermelhas (*Red Sequence*), verdes (*Green Valley*) ou azuis (*Blue Cloud*). Sabe-se que as galáxias da *Red Sequence* tendem a ser galáxias elípticas, mais velhas, massivas e com ausência de formação estelar recente. Já as que compõem a *Blue Cloud* são caracterizadas por serem galáxias irregulares ou galáxias-disco, com massa relativamente pequena.

As galáxias vermelhas são em sua maioria mais massivas, que quando se formaram geraram estrelas com altas taxas de formação estelar (SFR do inglês *Star Formation Rate*), e por consequência são galáxias ricas em metais. Já as galáxias azuis são menos massivas e têm menores valores de metalicidade. Esta relação empírica de massa-metalicidade é bem conhecida, e pode ser encontrada tanto em galáxias com linhas de emissão (Zahid et al., 2013) como nas galáxias de modo geral (Gallazzi et al., 2005).

Conforme o gás em uma galáxia da *Blue Cloud* vai se exaurindo, esta migra para a *Red Sequence*, de modo que as galáxias no *Green Valley* estão exatamente nesta transição. Uma galáxia da *Red Sequence* pode também sofrer colisões com outras galáxias, ativando a formação estelar e regressando para o *Green Valley*.

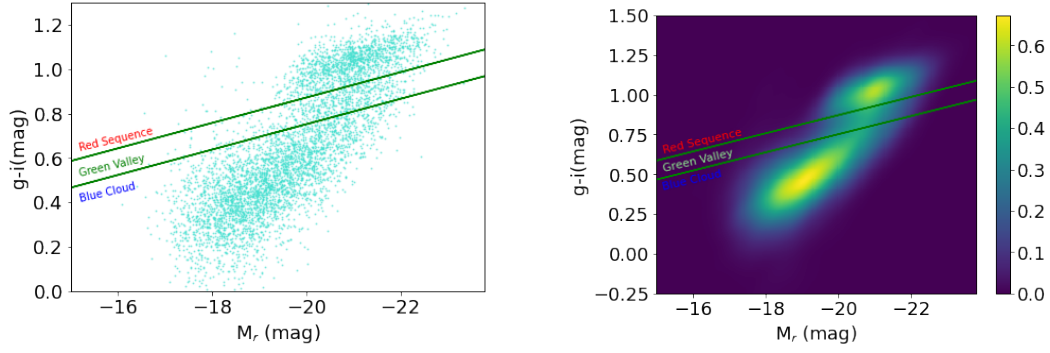


Figura 2.5: Diagrama Cor-Magnitude da amostra, e a divisão entre *Blue Cloud*, *Green Valley* e *Red Sequence*, onde g , i e M_r são magnitudes absolutas. A reta de limite superior é dada por $g - i = -0.0571*(M_r + 24) + 1.10$, e a inferior é paralela com uma diferença de -0.12 de cor (Papastergis et al., 2003). À direita temos o mesmo diagrama mas com níveis de densidade.

Analisando o gráfico à direita na Figura 2.5, nota-se que nossa amostra tem maior densidade de galáxias azuis.

Feita essa caracterização, selecionamos 5 galáxias de cada grupo (vermelhas, verdes e azuis) de modo aleatório, afim de treinar a metodologia e utilizá-las no código de ajuste de SED. As galáxias selecionadas estão identificadas na Figura 2.6, e suas identificações e coordenadas estão expostas na Tabela 2.2.

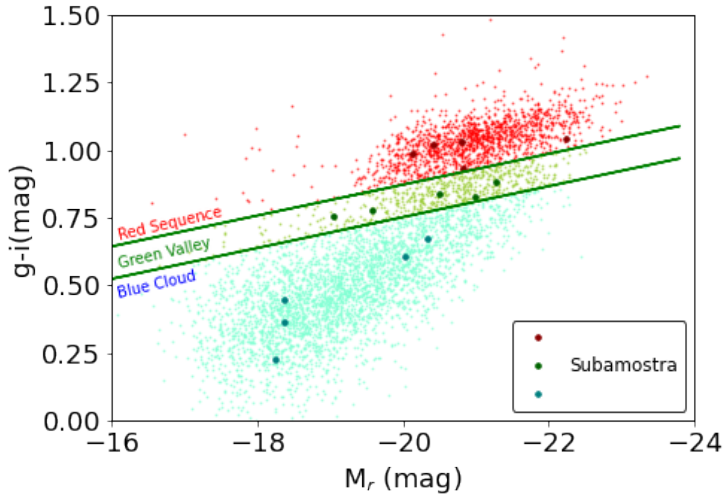


Figura 2.6: Diagrama Cor-Magnitude da amostra, com destaque para as 15 galáxias escolhidas.

Tabela 2.2 - ID, coordenadas e cor das 15 galáxias escolhidas, onde ‘RA’ é a ascensão reta e ‘Dec’ a declinação (em J2000).

ID do objeto	RA	Dec	Cor
1237663457778664101	322.252522	0.183908	Vermelha
1237663544223727859	339.189271	0.835094	
1237663783662846140	5.346848	-0.360683	
1237663783664156791	8.266957	-0.331154	
1237663543675847377	313.957789	0.373928	
1237666407365935200	353.681540	-0.425418	Verde
1237663543148806319	336.383976	-0.141400	
1237657070092484687	43.593007	-0.422505	
1237666299484373252	56.119735	-0.954762	
1237663783131152550	17.157560	-0.702536	
1237663543675520551	313.181648	0.372571	Azul
1237663239271940430	41.212372	0.526653	
1237663542605252155	321.202644	-0.518420	
1237666340801020030	19.892207	1.117884	
1237663462606635126	349.231617	0.668018	

Após o processo de aprendizagem do código feito com essa subamostra, selecionamos todas as galáxias pertencentes à *Blue Cloud*, com a finalidade de estudar este grupo mais detalhadamente. Na amostra há 3534 galáxias azuis, e os fluxos f_ν destas foram utilizados como dados de entrada no código de ajuste.

Metodologia

A segunda parte do estudo consistiu em aprender a técnica e o uso de um código de ajuste de SEDs em 5 galáxias de cada grupo para enfim utilizá-lo na subamostra contendo as galáxias do grupo *Blue Cloud*. Foi feita a leitura dos artigos Conroy (2013) e Walcher et al. (2011) e em seguida o Código de Investigação da Emissão de Galáxias (CIGALE, do inglês *Code Investigating GALaxy Emission*, Boquien et al. 2018) foi escolhido entre os vários disponíveis na literatura por utilizar a linguagem de programação `python` e também possuir um artigo, um manual e um site¹, facilitando o aprendizado.

3.1 CIGALE

Fez-se um estudo através da leitura do artigo e do manual² do CIGALE para o ajuste das SEDs de galáxias (Boquien et al., 2018). A principal característica do código é a sua modularidade, isto é, o fato do CIGALE ser dividido em quatro blocos independentes: manipulação de entrada (responsável pela leitura e processamento dos dados), cálculo dos modelos (como SSPs, atenuação por poeira, entre outros), análise (analisa as observações e estima as propriedades físicas), e o tratamento de saída (onde são registrados os melhores resultados, os valores de χ^2 , etc.).

Os modelos criados também são tratados como módulos independentes, onde cada um corresponde a um processo físico. Portanto há um módulo para calcular a história de formação de estrelas (SFH do inglês *Star Formation History*), outro responsável pelos modelos de SSPs, um destinado a atenuação por poeira, etc. Os modelos são calculados com base nos parâmetros de entrada selecionados previamente pelo usuário e estão ligados

¹ <https://cigale.lam.fr/>

² <https://cigale.lam.fr/documentation/>

diretamente com a estimativa final pois a combinação destes gera espectros teóricos que serão comparados com as observações.

Para a análise final utiliza-se uma inferência Bayesiana, levando em conta o ponderamento das verossimilhanças encontradas. O código retorna parâmetros das galáxias como a massa estelar, massa do gás, idade ponderada pela massa, idade da população estelar principal, luminosidade estelar, metalicidade, entre outros.

Na tentativa de instalar os modelos do código, um problema ocorreu e não foi possível ter acesso à ele. Contato foi feito com um dos autores - Denis Burgarella - que rapidamente se disponibilizou para auxiliar, avisando que tal problema poderia estar relacionado ao sistema operacional **Windows**. Em uma nova tentativa, agora utilizando o sistema operacional **Linux**, a transferência dos modelos foi realizada com sucesso.

Para o aprendizado do código, junto ao manual de uso há dados de exemplo para serem testados. Assim foi feita a compilação do código CIGALE com dados de teste e o resultado do ajuste se encontra na Figura 3.1.

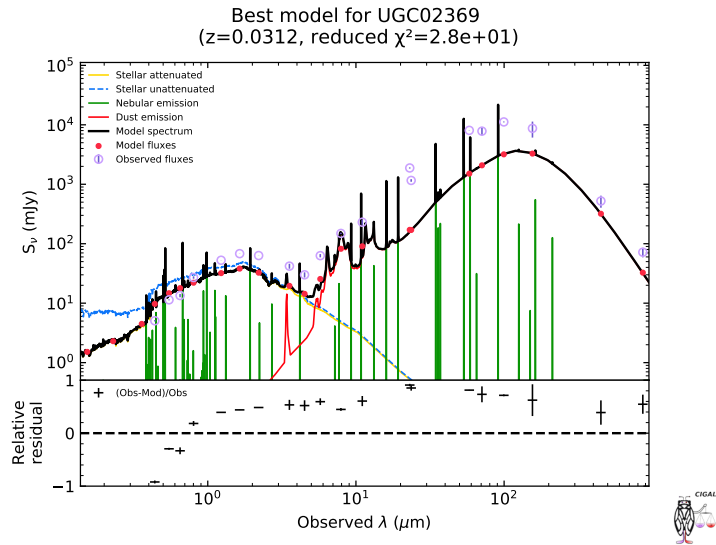


Figura 3.1: Exemplo do ajuste da SED utilizando o código CIGALE.

O ajuste de teste da Figura 3.1 não dá uma boa estimativa, pois utilizou-se apenas um valor para cada parâmetro de entrada, de modo que uma pequena quantidade de modelos teóricos de SEDs são computados e comparados com as SEDs observadas.

Por fim, utilizou-se como entrada no CIGALE os dados das cinco galáxias de cada grupo escolhidas na Seção 2.3, contendo a identificação, o *redshift* fotométrico e os fluxos

f_ν de cada banda **ugriz** e suas respectivas incertezas. As configurações iniciais estipuladas foram as seguintes:

- modelo de SSP de Bruzual & Charlot (2003);
- SFH intitulada como *delayed*, da forma $SFR(t) \propto \frac{t}{\tau} \times \exp(-t/\tau)$;
- o módulo de emissão nebular (utilizado apenas para a análise das 5 galáxias azuis);
- módulo da atenuação de poeira dada por lei de potências;
- modelo da emissão de poeira de Dale et al. (2014);
- função de massa inicial (IMF do inglês *Initial Mass Function*) de Salpeter (1955) e
- método de análise de função de densidade de probabilidade.

Mais informações sobre os parâmetros de entrada e suas variações podem ser encontradas no Apêndice B.

3.2 Parâmetros de entrada

Após essa primeira análise dos dados, fez-se um estudo mais detalhado sobre cada módulo de entrada do código, através da leitura do artigo de Boquien et al. (2018). Assim, pode-se caracterizar os parâmetros de entrada do CIGALE da seguinte forma:

História de Formação Estelar: também chamado de SFH. Isto é, a Taxa de Formação Estelar pelo tempo. Há 6 tipos, representados na Figura 3.2, que podem ser utilizados:

1. **sfh2exp:** dupla exponencial dada pela equação:

$$SFR(t) \propto \begin{cases} \exp(-t/\tau_0) & \text{se } t < t_0 - t_1 \\ \exp(-t/\tau_0) + k \times \exp(-t/\tau_1) & \text{se } t \geq t_0 - t_1 \end{cases} \quad (3.1)$$

onde t_0 é o tempo em que a galáxia começou a formar estrelas, e t_1 é o tempo de uma segunda formação estelar. τ_0 e τ_1 são os tempos de ‘dobramento’ das populações que modelam as populações estelares mais antigas e o episódio mais recente de formação estelar, e k a amplitude relativa da segunda exponencial;

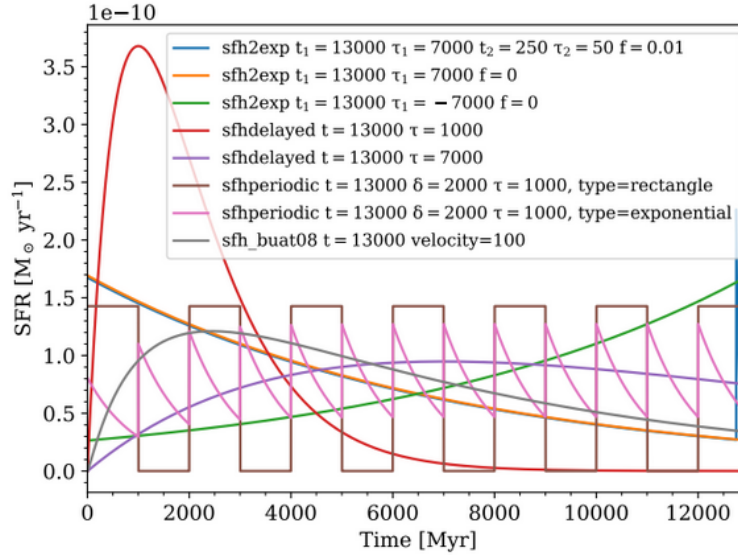


Figura 3.2: Módulos de SFHs presentes no código CIGALE. Figura 1 de Boquien et al. (2018).

2. `sfhdelayed`: intitulada como “atrasada” com *burst* (explosão de formação estelar) exponencial opcional. É dada pela forma:

$$SFR(t) \propto \frac{t}{\tau^2} \times \exp(-t/\tau) \quad \text{para } 0 \leq t \leq t_0 \quad (3.2)$$

aqui τ é o tempo onde há um pico de formação estelar;

3. `sfhdelayedbq`: SFH “atrasada” com explosão ou cessação de formação estelar constante opcional;
4. `sfh_buat08`: SFH dependente da velocidade de rotação da galáxia (Buat et al., 2008);
5. `sfhfromfile`: SFH arbitrária lida de um arquivo de entrada;
6. `sfhperiodic`: periódica, podendo ser da forma exponencial, retangular ou “atrasada”.

População Estelar Simples: modelo teórico de uma SSP, onde há 2 tipos que podem ser utilizados:

1. `bc03`: Modelo de Bruzual & Charlot (2003). São permitidas metalicidades $Z = 0.0001, 0.0004, 0.004, 0.008, 0.02$ e 0.05 ; e as IMFs de Salpeter (1955) ou Chabrier (2003);

2. **m2005**: Modelo de Maraston (2005). São permitidas metalicidades $Z = 0.001$, 0.01 , 0.02 e 0.04 ; e as IMFs de Salpeter (1955) ou Kroupa (2001). Este modelo não pode ser utilizado em conjunto com o modelo de emissão nebular.

Emissão nebular: causada por fótons de alta energia emitidos por estrelas massivas que ionizam o gás circundante. O modelo utilizado é o de Inoue (2011).

Atenuação por poeira: absorção de radiação causada por poeira do meio intergaláctico e poeira das nebulosas. Essa radiação é reemitida no infravermelho médio e distante. Há 3 tipos para uso:

1. **dustatt_powerlaw**: utiliza uma única lei de potência para estrelas jovens e velhas, apenas com uma atenuação absoluta diferente;
2. **dustatt_modified_CF00**: modelo modificado da lei de atenuação de Charlot & Fall (2000);
3. **dustatt_modified_starburst**: modelo modificado da lei de atenuação de Calzetti et al. (2000).

Há ainda 5 módulos: Emissão por poeira, Galáxia com Núcleo Ativo (AGN), Emissões no Rádio, Parâmetros de *Restframe* e *Redshift*. Estes não serão usados no projeto pois estão fora do intervalo de comprimento de onda dos dados (faixa do visível) ou não se aplicam às galáxias azuis.

Escolheu-se testar os modelos **sfh2exp** e **sfhdelayed** de SFHs por serem os mais utilizados na literatura. Já para a atenuação por poeira, apenas o modelo de Calzetti et al. (2000) não é utilizado por ser focado em AGNs.

Para testar o impacto de cada módulo nos resultados, deve-se alterar determinado módulo e deixar o restante fixo. Optou-se como padrão os seguintes parâmetros de entrada: **sfhdelayed** para SFH, **bc03** para SSP com a IMF de Salpeter (1955) e **dustatt_powerlaw** para a atenuação por poeira (quando estes não estiverem sendo analisados e portanto variados).

Tendo escolhido os módulos que serão avaliados, o passo seguinte é verificar quais parâmetros de entrada cada módulo exige e analisar os valores adequados que se deve inserir no código. Para compreender tais valores, foi feita a leitura dos artigos Carnall et al. (2019), Inoue (2011) e Charlot & Fall (2000), referentes a SFH, emissão nebular e

atenuação por poeira respectivamente. Os valores dos parâmetros encontram-se disponíveis no Apêndice C.

Por fim, 6 configurações foram testadas, sendo elas as seguintes combinações de parâmetros de entrada:

- I. sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw;
- II. sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw;
- III. sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw;
- IV. sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw;
- V. sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw;
- VI. sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.

Resultados

Aqui apresentam-se os resultados referentes aos dados de teste, utilizando a subamostra com 5 galáxias de cada grupo, e os resultados de cada configuração empregada na amostra de galáxias azuis.

4.1 Subamostra de teste

Os parâmetros de entrada utilizados no exemplo do manual do CIGALE foram usados nos dados das 15 galáxias citadas na Seção 2.3, sendo: SFH *delayed*, SSP de Bruzual & Charlot (2003) com IMF de Salpeter (1955), emissão nebular de Inoue (2011), atenuação por poeira da lei de potência e emissão de poeira de Dale et al. (2014). Os resultados obtidos para o melhor ajuste estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros encontrados para as galáxias escolhidas, onde $M_{\star}$ é a massa estelar total, $M_{\text{gás}}$ é a massa do gás total, Idade_M a idade ponderada pela massa e Z a metalicidade da galáxia.

ID do objeto	$M_{\star}(M_{\odot})$	$M_{\text{gás}}(M_{\odot})$	Luminosidade(W)	$\text{Idade}_M(\text{Ganos})$	Z	Cor
1237663457778664101	$(9.28 \pm 2.99) \times E10$	1.73E10	1.23E38	1.50	0.0004	Vermelha
1237663544223727859	$(7.40 \pm 1.71) \times E8$	1.78E8	1.26E36	0.57	0.0004	
1237663783662846140	$(4.00 \pm 1.12) \times E11$	1.77E11	4.27E37	9,00	0.02	
1237663783664156791	$(2.37 \pm 0.79) \times E9$	5.95E8	8.87E36	0.57	0.02	
1237663543675847377	$(4.53 \pm 1.26) \times E10$	2.01E10	5.68E36	9.50	0.05	
1237666407365935200	$(7.40 \pm 2.28) \times E8$	2.52E8	1.86E36	0.89	0.008	Verde
1237663543148806319	$(2.79 \pm 0.96) \times E11$	5.61E10	4.51E37	3.50	0.008	
1237657070092484687	$(1.35 \pm 0.40) \times E10$	5.13E9	1.24E37	5.37	0.02	
1237666299484373252	$(5.00 \pm 1.43) \times E10$	1.46E10	7.66E37	1.53	0.02	
1237663783131152550	$(3.55 \pm 1.00) \times E10$	1.56E10	2.74E37	4.99	0.02	

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.1 - Continuação

ID do objeto	$M_{\star\text{total}}(M_{\odot})$	$M_{\text{gás}\text{total}}(M_{\odot})$	Luminosidade(W)	Idade _M (Ganos)	Z	Cor
1237663543675520551	$(1.95 \pm 0.62) \times E9$	3.53E8	2.51E36	1.15	0.0004	
1237663239271940430	$(4.38 \pm 1.24) \times E10$	1.88E10	5.31E36	1.50	0.05	
1237663542605252155	$(1.38 \pm 0.42) \times E10$	3.30E9	2.44E37	6.31	0.0004	Azul
1237666340801020030	$(2.42 \pm 0.89) \times E9$	4.77E8	3.39E36	0.57	0.02	
1237663462606635126	$(9.54 \pm 2.33) \times E8$	2.29E8	3.42E36	0.34	0.004	

O ajuste da fotometria de cada galáxia pode ser visto no Apêndice D. Em geral as curvas foram bem ajustadas aos dados observados, obtendo baixos valores de χ^2 reduzidos. Através dos dados da Tabela 4.1, percebe-se uma certa relação entre galáxias da Sequência Vermelha terem maiores metalicidades e maiores massas, o que está de acordo com o esperado pela relação massa-metalicidade.

4.2 Análise das galáxias da Nuvem Azul

O código de ajuste de SED foi aplicado à amostra com 3534 galáxias da *Blue Cloud* com 6 configurações diferentes. Os parâmetros de entrada foram variados conforme explicado na Seção 3.2. Seleciona-se então os resultados dos ajustes. A Figura 4.1 apresenta a distribuição dos resultados de cada configuração através da estimativa de densidade de Kernel.

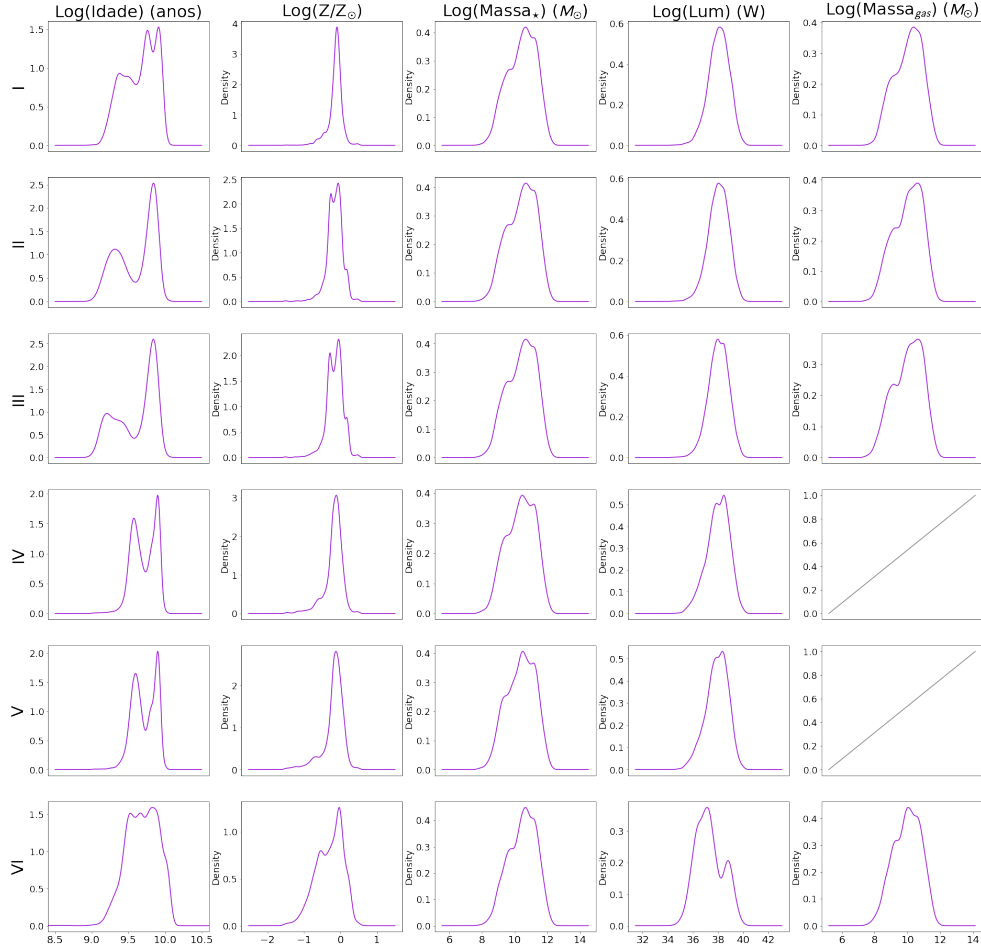


Figura 4.1: Distribuição dos resultados de cada configuração. As configurações são referentes aos seguintes modelos: I - sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; II - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; III - sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw; IV - sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw; V - sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw e VI - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.

Vale ressaltar também que as configurações IV e V não possuem dados de massa do gás pois nestas foram utilizadas o modelo de SSP de Maraston (2005), que não deve ser empregado junto ao módulo `nebular` (vide Seção 3.2). Os valores medianos dos parâmetros para cada configuração encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores medianos dos resultados de cada configuração e suas incertezas, referentes às diferenças entre o 3º quartil e a mediana, e entre o 1º quartil e a mediana. M_* é a massa estelar total, $M_{\text{gás}}$ é a massa do gás total, Idade é a idade da população estelar principal e Z a metalicidade da galáxia.

Configuração	Idade (Ganos)	Z	$M_*(10^{10} M_\odot)$	$M_{\text{gás}}(10^{10} M_\odot)$	Luminosidade(10^{37}W)
I	$5.06^{+2.70}_{-2.49}$	$0.015^{+0.002}_{-0.002}$	$3.18^{+9.95}_{-2.66}$	$1.08^{+3.74}_{-0.94}$	$2.51^{+4.37}_{-1.63}$
II	$6.02^{+2.09}_{-3.53}$	$0.014^{+0.004}_{-0.003}$	$3.04^{+9.68}_{-2.54}$	$0.97^{+3.38}_{-0.83}$	$2.66^{+4.64}_{-1.72}$
III	$6.35^{+1.86}_{-3.84}$	$0.014^{+0.004}_{-0.004}$	$1.78^{+5.64}_{-1.48}$	$1.14^{+4.19}_{-0.99}$	$2.72^{+4.74}_{-1.75}$
IV	$4.15^{+3.54}_{-1.59}$	$0.013^{+0.002}_{-0.002}$	$2.06^{+7.60}_{-1.71}$	-	$2.43^{+4.63}_{-1.68}$
V	$4.10^{+3.63}_{-1.40}$	$0.013^{+0.003}_{-0.002}$	$1.39^{+4.85}_{-1.14}$	-	$2.43^{+4.71}_{-1.68}$
VI	$4.92^{+2.32}_{-1.55}$	$0.009^{+0.006}_{-0.005}$	$3.48^{+9.48}_{-2.81}$	$1.03^{+3.03}_{-0.81}$	$1.57^{+10.42}_{-1.26}$

4.3 Impacto das diferentes configurações nos parâmetros de população estelar

Para compreender melhor o impacto da alteração dos parâmetros de entrada nos de saída, faz-se uma comparação dos resultados de população estelar encontrados com cada configuração. Conforme foi visto na Seção 3.2, as configurações estudadas foram a parametrização da história de formação estelar, o modelo de população estelar, de emissão nebular e atenuação por poeira. Constata-se que nenhuma dessas configurações teve um grande impacto nos resultados de massa estelar e massa do gás, pois os valores obtidos para essas propriedades físicas pouco se alteraram, e por isso voltaremos nossa atenção aos parâmetros restantes. O gráficos de comparação das massas encontram-se no Apêndice F.

Foca-se então nos parâmetros de idade da população estelar principal da galáxia, fração de massa de metalicidade Z e luminosidade estelar, obtendo os gráficos das Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, onde a diagonal de cada figura representa uma estimativa de densidade de Kernel de cada parâmetro.

Cada número representa a seguinte configuração:

- I. sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw;
- II. sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw;
- III. sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw;

IV. sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw;

V. sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw;

VI. sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.

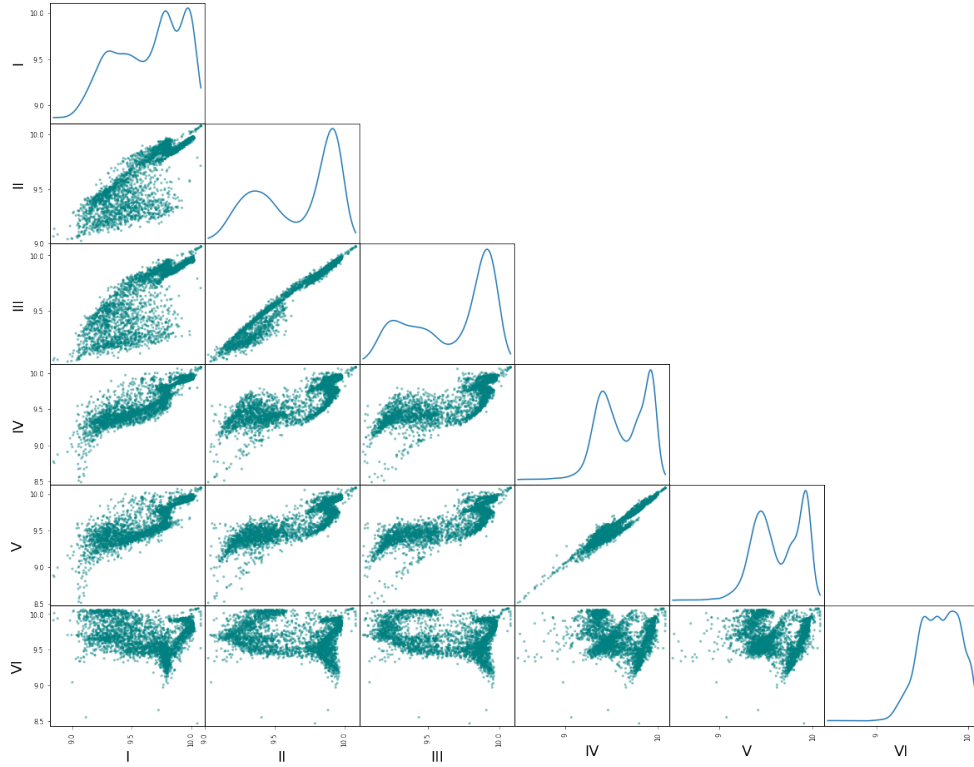


Figura 4.2: Gráficos comparativos dos parâmetros de idade da população estelar principal da galáxia encontrados para cada configuração. Os valores dos eixos representam $\log_{10}(\text{Idade})$ em anos. As configurações são referentes aos seguintes modelos: I - sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; II - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; III - sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw; IV - sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw; V - sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw e VI - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.

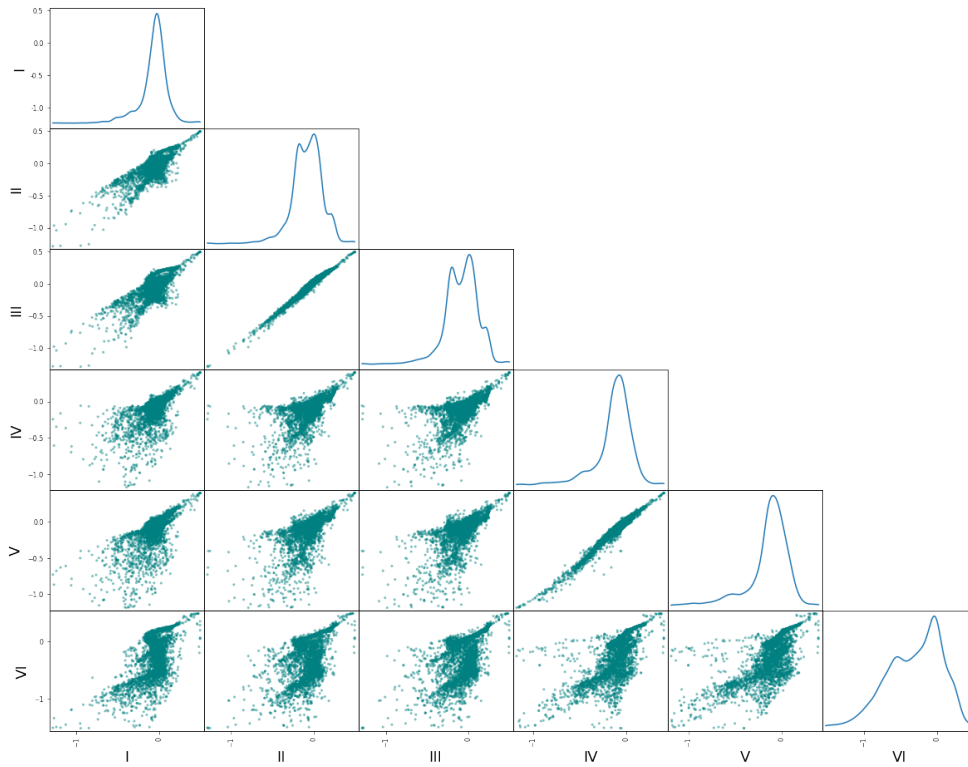


Figura 4.3: Gráficos comparativos dos parâmetros de metalicidade encontrados para cada configuração. Os valores dos eixos representam $\log_{10}(Z/Z_{\odot})$. As configurações são referentes aos seguintes modelos: I - sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; II - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; III - sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw; IV - sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw; V - sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw e VI - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.

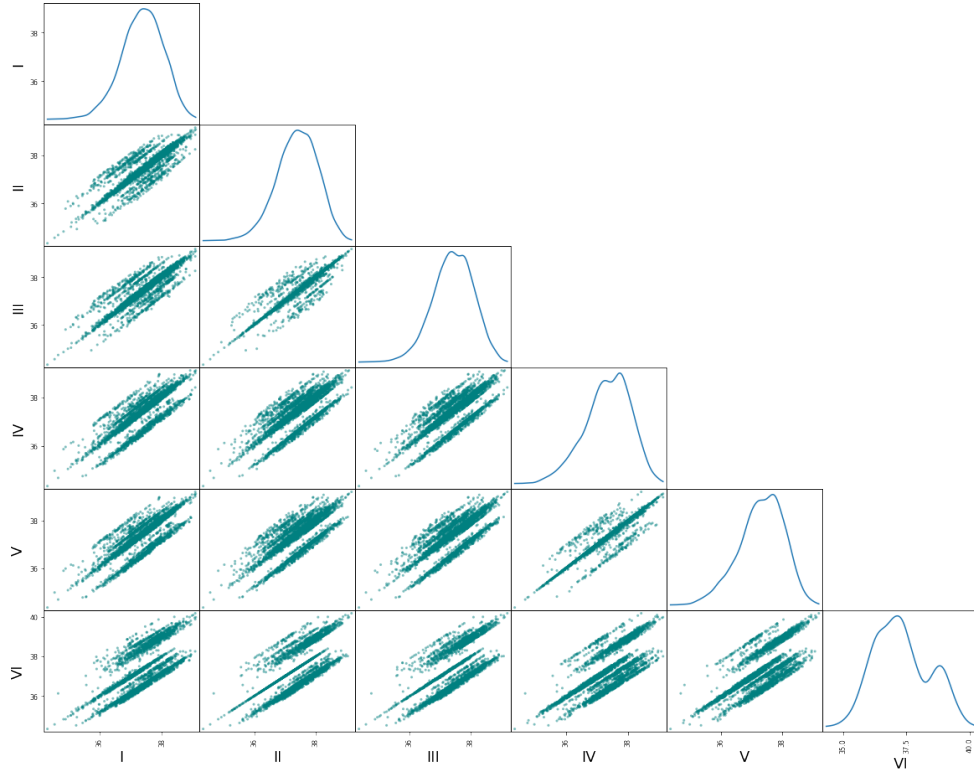


Figura 4.4: Gráficos comparativos dos parâmetros de luminosidade estelar encontrados para cada configuração. Os valores dos eixos representam $\log_{10}(\text{luminosidade})$ em Watts. As configurações são referentes aos seguintes modelos: I - sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; II - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; III - sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw; IV - sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw; V - sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw e VI - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.

Discussão

Investiga-se aqui a população estelar que foi obtida para a nossa amostra e o impacto das configurações utilizadas como entrada do código CIGALE nos resultados, através da análise dos gráficos apresentados na Seção 4.3.

5.1 *A população estelar das galáxias azuis*

Para analisar a população estelar que compõe as galáxias da amostra, escolhemos a configuração II, onde foram utilizados os parâmetros de entrada padrões `sfhdelayed`, `bc03` com a IMF de Salpeter (1955), `nebular` e `dustatt_powerlaw`. Os valores medianos dos resultados obtidos com essa configuração se encontram na Tabela 4.2. Analisando os dados através da Figura 5.1, nota-se que existe uma correlação entre massa estelar, idade, luminosidade e massa do gás. Os gráficos dos resultados para cada configuração encontram-se no Apêndice E, onde também pode-se observar as mesmas correlações entre os parâmetros.

5.2 *Impacto da escolha da IMF*

As configurações onde os modelos de IMFs são alterados correspondem as II×III e IV×V. Analisando os gráficos destas configurações (nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4), nota-se pouca variação na estimativa dos resultados, onde podemos concluir que alterar este parâmetro pouco interfere no resultado.

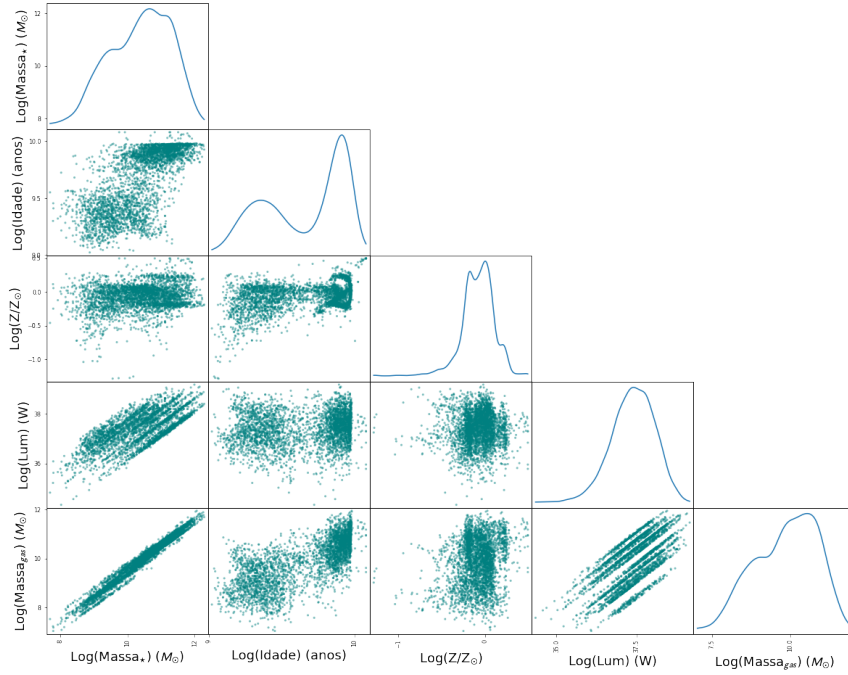


Figura 5.1: Gráficos comparativos dos resultados utilizando a configuração II (sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw).

5.3 Impacto da escolha do modelo de atenuação por poeira

Examinando as Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, percebe-se que a configuração VI, isto é, a única configuração que se utiliza do modelo de atenuação por poeira dado por Charlot & Fall (2000), causa um grande impacto nos resultados, alterando bastante as estimativas de idade, metalicidade Z e luminosidade. Nota-se também através da Figura 4.1 que a distribuição destes parâmetros é bastante modificada em comparação com as outras configurações.

5.4 Metalicidade

Constata-se ainda que os valores de metalicidade Z (Figura 4.3) estão em sua maioria próximos da metalicidade solar (neste trabalho utiliza-se $Z_{\odot} = 0.016$), o que é um valor relativamente alto para galáxias azuis. Mas segundo Koleva et al. (2008), o modelo de SSP de Bruzual & Charlot (2003) tende a favorecer a metalicidade solar. Além disso, os dados estão no intervalo de *redshift* entre $0.05 \leq z \leq 0.1$, ou seja, a amostra contém galáxias do Universo local e por conta disso podem ter metalicidades relativamente altas.

5.5 Massas

Como comentado no Capítulo 4, mesmo alterando os modelos de entrada de várias formas, a inferência da massa estelar e do gás permaneceu com pouca alteração nos resultados, mostrando que estes são parâmetros bem modelados (Apêndice F).

5.6 Idade

Analisando as idades da amostra, podemos ver na Figura 4.1 que este parâmetro é o que tem maior alteração na distribuição dos dados de acordo com as diferentes configurações. Essa diferença é causada pela mudança de parametrização de SFH (configuração I) e dos modelos de SSPs (configurações II e III para IV e V), porém em todos os casos os picos das distribuições se encontram relativamente próximos.

Conclusões

O objetivo de compreensão do funcionamento da técnica de ajuste de SEDs de galáxias foi alcançado. Além disso, novos conhecimentos foram atingidos, como por exemplo, coletar os dados do SDSS através do site **CasJobs**, entender quais parâmetros são importantes para poder gerar modelos de SEDs, além da ampliação dos conhecimentos de **python**.

Aprender a utilizar o CIGALE requiriu muitas buscas em artigos (citados neste trabalho), estudos de galáxias e de análise de dados. Estar em contato com um dos autores facilitou o processo e garantiu um bom resultado.

Sobre os parâmetros das galáxias azuis, pode-se dizer que em todos os casos a relação entre estes foram condizentes com o esperado. Examinando os resultados da configuração padrão II (com os módulos **sfhdelayed**, **bc03(IMF Salpeter)**, **nebular** e **dustatt_powerlaw**), os valores medianos obtidos foram: idade de $6.02^{+2.09}_{-3.53}$ Ganos, metalicidade Z de $0.014^{+0.004}_{-0.003}$, massa estelar de $(3.04^{+9.68}_{-2.54})10^{10} M_{\odot}$, massa do gás de $(0.97^{+3.38}_{-0.83})10^{10} M_{\odot}$ e luminosidade de $(2.66^{+4.64}_{-1.72})10^{37}$ W (vide Tabela 4.2).

Foi possível analisar o impacto que cada parâmetro de entrada causou no resultado final da amostra, onde conclui-se que os valores de massa estelar e massa do gás da galáxia são pouco alterados, mas parâmetros como idade, metalicidade e luminosidade podem ter uma grande variação dependendo do modelo de SSP, SFH ou de atenuação por poeira escolhido previamente. Porém os modelos de IMFs utilizados no módulo de SSP não tiveram impacto considerável no resultado da amostra.

Para a continuação do projeto, o modelo de atenuação por poeira, que causou a maior alteração na inferência dos resultados, deve ser estudado mais detalhadamente para que seja possível modelar corretamente a população estelar das galáxias.

Referências Bibliográficas

- Ahumada R., et al., 2020, ApJS, 249, 3
- Boquien M., Burgarella D., Roehlly Y., Buat V., Ciesla L., Corre D., Inoue A. K., Salas H., 2018, A&A, 622, 1
- Bruzual G., Charlot S., 2003, MNRAS, 344, 1000
- Buat V., et al., 2008, A&A, 483, 107
- Budavári T., Wild V., Szalay A. S., Dobos L., Yip C. W., 2009, MNRAS, 394, 1496–1502
- Calzetti D., Armus L., Bohlin R. C., Kinney A. L., Koornneef J., Storchi-Bergmann T., 2000, ApJ, 533, 682
- Carnall A. C., Leja J., Johnson B. D., McLure R. J., Dunlop J. S., Conroy C., 2019, ApJ, 873, 44
- Chabrier G., 2003, PASP, 115, 763
- Charlot S., Fall S. M., 2000, ApJ, 539, 718
- Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Stasińska G., Gomes J. M., 2005, MNRAS, 358, 363
- Coelho P., Bruzual G., Charlot S., Weiss A., Barbuy B., Ferguson J. W., 2007, MNRAS, 382, 498
- Conroy C., 2013, ARA&A, 51, 393

- Dale D. A., Helou G., Magdis G. E., Armus L., Díaz-Santos T., Shi Y., 2014, *AJ*, 784, 83, 11pp
- Doi M., et al., 2010, *AJ*, 139, 54
- Gallazzi A., Charlot S., Brinchmann J., White S. D. M., Tremonti C. A., 2005, *MNRAS*, 362, 41
- Groves B., Dopita M. A., Sutherland R. S., Kewley L. J., Fischera J., Leitherer C., Brandl B., van Breugel W., 2008, *ApJS*, 176
- Iglesias-Páramo J., et al., 2007, *ApJ*, 670, 279
- Inoue A. K., 2011, *MNRAS*, 415, 2920–2931
- Kauffmann G., et al., 2003, *MNRAS*, 341, 33
- Koleva M., Prugniel p., Ocvirk P., Le Borgne D., Soubiran C., 2008, *MNRAS*, 385, 1998
- Kroupa P., 2001, *MNRAS*, 322, 231
- Maraston C., 2005, *MNRAS*, 362, 799
- Oke J. B., Gunn J. E., 1983, *AJ*, 266, 713
- Papastergis E., Giovanelli R., Haynes M. P., Rodríguez-Puebla A., Jones M. G., 2003, *AJ*, 776, 18pp
- Salpeter E. E., 1955, *AJ*, 121, 161
- Vazdekis A., Koleva M., Ricciardelli E., Röck B., Falcón-Barroso J., 2016, *MNRAS*, 463, 3409
- Walcher J., Groves B., Budavári T., Dale D., 2011, *Ap&SS*, 331, 1
- Zahid J. H., Geller M., Kewley L., Hwang H. S., Fabricant D., Kurtz M., 2013, *ApJ*, 771,

Apêndice

Apêndice A

Código SQL

O código seguinte foi utilizado duas vezes, alterando-se apenas os valores de α : $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ e $310^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ em coordenadas do tipo J2000.

```
1 SELECT DISTINCT p.objID AS DR16_objID, p.specObjID, p.ra, p.dec,
  ↪ p.modelMag_u, p.modelMag_g, p.modelMag_r, p.modelMag_i, p.modelMag_z,
  ↪ p.modelMagErr_u, p.modelMagErr_g, p.modelMagErr_r, p.modelMagErr_i,
  ↪ p.modelMagErr_z, p.modelFlux_r, p.modelFluxIvar_r, p.extinction_u,
  ↪ p.extinction_g, p.extinction_r, p.extinction_i, p.extinction_z,
  ↪ p.dered_u, p.dered_g, p.dered_r, p.dered_i, p.dered_z, p.nObserve,
  ↪ p.score, p.probPSF AS probability_star, p.petroR50_r, p.petroR90_r,
  ↪ z.z AS photoZ, z.zErr AS photoZ_err, z.kcorrU, z.kcorrG, z.kcorrR,
  ↪ z.kcorrI, z.kcorrZ, z.absMagU, z.absMagG, z.absMagR, z.absMagI,
  ↪ z.absMagZ, z.lumDist, z.nnAvgZ, z.nnObjID, z.nnSpecz
2 FROM PhotoObjAll AS p, Galaxy AS g, Photoz AS z
3 WHERE p.objID = z.objID AND g.objID=p.objID AND p.ra>=310 AND p.ra<=360
  ↪ AND p.type=3 AND p.dec>=-1.25 AND p.dec<=1.25 AND z.zErr<>-9999 AND
  ↪ z.photoErrorClass=1 AND (g.Flags & (0x00000000000040000 +
  ↪ 0x0000000000000002 + 0x0000080000000000)) = 0 AND p.nChild=0 AND
  ↪ z.z>0.005 AND z.z <=0.1 AND p.dered_r<=22.0 AND p.clean=1
4 INTO MyDB.Stripe82_1half
```


Apêndice B

Código com parâmetros de entrada utilizados no CIGALE

A seguir o código utilizado como entrada no CIGALE, juntamente com os parâmetros escolhidos. O módulo *nebular* foi utilizado apenas para as galáxias azuis.

```
1  # File containing the input data. The columns are 'id' (name of the
2  # object), 'redshift' (if 0 the distance is assumed to be 10 pc),
3  # 'distance' (Mpc, optional, if present it will be used in lieu of the
4  # distance computed from the redshift), the filter names for the fluxes,
5  # and the filter names with the '_err' suffix for the uncertainties. The
6  # fluxes and the uncertainties must be in mJy for broadband data and in
7  # W/m2 for emission lines. This file is optional to generate the
8  # configuration file, in particular for the savefluxes module.
9  data_file = quinze_gal
10
11 # Optional file containing the list of physical parameters. Each column
12 # must be in the form module_name.parameter_name, with each line being a
13 # different model. The columns must be in the order the modules will be
14 # called. The redshift column must be the last one. Finally, if this
15 # parameter is not empty, cigale will not interpret the configuration
16 # parameters given in pcigale.ini. They will be given only for
17 # information. Note that this module should only be used in conjunction
18 # with the savefluxes module. Using it with the pdf_analysis module will
19 # yield incorrect results.
```

```

20 parameters_file =
21
22 # Available modules to compute the models. The order must be kept.
23 # SFH:
24 # * sfh2exp (double exponential)
25 # * sfhdelayed (delayed SFH with optional exponential burst)
26 # * sfhdelayedbbq (delayed SFH with optional constant burst/quench)
27 # * sfhfromfile (arbitrary SFH read from an input file)
28 # * sfhperiodic (periodic SFH, exponential, rectangle or delayed)
29 # SSP:
30 # * bc03 (Bruzual and Charlot 2003)
31 # * m2005 (Maraston 2005; note that it cannot be combined with the
    ↪ nebular module)
32 # Nebular emission:
33 # * nebular (continuum and line nebular emission)
34 # Dust attenuation:
35 # * dustatt_modified_CF00 (modified Charlot & Fall 2000 attenuation law)
36 # * dustatt_modified_starburst (modified Calzetti 2000 attenuaton law)
37 # Dust emission:
38 # * casey2012 (Casey 2012 dust emission models)
39 # * dale2014 (Dale et al. 2014 dust emission templates)
40 # * dl2007 (Draine & Li 2007 dust emission models)
41 # * dl2014 (Draine et al. 2014 update of the previous models)
42 # * themis (Themis dust emission models from Jones et al. 2017)
43 # AGN:
44 # * fritz2006 (AGN models from Fritz et al. 2006)
45 # Radio:
46 # * radio (synchrotron emission)
47 # Restframe parameters:
48 # * restframe_parameters (UV slope (beta), IRX, D4000, EW, etc.)
49 # Redshift+IGM:
50 # * redshifting (mandatory, also includes the IGM from Meiksin 2006)

```

```

51 sed_modules = sfhdelayed, bc03, nebular, dustatt_powerlaw, dale2014,
    ↪ redshifting
52
53 # Method used for statistical analysis. Available methods: pdf_analysis,
54 # savefluxes.
55 analysis_method = pdf_analysis
56
57 # Number of CPU cores available. This computer has 8 cores.
58 cores = 8
59
60 # Bands to consider. To consider uncertainties too, the name of the band
61 # must be indicated with the _err suffix. For instance: FUV, FUV_err.
62 bands = sdss.up, sdss.up_err, sdss.gp, sdss.gp_err, sdss.rp, sdss.rp_err,
    ↪ sdss.ip, sdss.ip_err, sdss.zp, sdss.zp_err
63
64 # Properties to be considered. All properties are to be given in the
65 # rest frame rather than the observed frame. This is the case for
66 # instance the equivalent widths and for luminosity densities.
67 properties =
68
69
70 # Configuration of the SED creation modules.
71 [sed_modules_params]
72
73 [[sfhdelayed]]
74     # e-folding time of the main stellar population model in Myr.
75     tau_main = 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000
76     # Age of the main stellar population in the galaxy in Myr. The
    ↪ precision
77     # is 1 Myr.
78     age_main = 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 10000, 12000
79     # e-folding time of the late starburst population model in Myr.

```

```

80     tau_burst = 50.0
81     # Age of the late burst in Myr. The precision is 1 Myr.
82     age_burst = 20
83     # Mass fraction of the late burst population.
84     f_burst = 0.0
85     # Multiplicative factor controlling the SFR if normalise is False.
86     ↪ For
87     # instance without any burst:  $SFR(t)=sfr\_A \times t \times \exp(-t/tau)/tau^2$ 
88     sfr_A = 1.0
89     # Normalise the SFH to produce one solar mass.
90     normalise = True
91
92 [[bc03]]
93     # Initial mass function: 0 (Salpeter) or 1 (Chabrier).
94     imf = 0
95     # Metalicity. Possible values are: 0.0001, 0.0004, 0.004, 0.008,
96     ↪ 0.02,
97     # 0.05.
98     metallicity = 0.0004, 0.008, 0.02, 0.05
99     # Age [Myr] of the separation between the young and the old star
100    # populations. The default value is 107 years (10 Myr). Set to 0 not
101    ↪ to
102    # differentiate ages (only an old population).
103    separation_age = 10
104
105 [[nebular]]
106     # Ionisation parameter
107     logU = -2.0
108     # Fraction of Lyman continuum photons escaping the galaxy
109     f_esc = 0.0
110     # Fraction of Lyman continuum photons absorbed by dust
111     f_dust = 0.0

```

```

109     # Line width in km/s
110     lines_width = 300.0
111     # Include nebular emission.
112     emission = True
113
114     [[dustatt_powerlaw]]
115     # V-band attenuation of the young population.
116     Av_young = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
117     # Reduction factor for the V-band attenuation of the old population
118     # compared to the young one (<1).
119     Av_old_factor = 0.44
120     # Central wavelength of the UV bump in nm.
121     uv_bump_wavelength = 217.5
122     # Width (FWHM) of the UV bump in nm.
123     uv_bump_width = 35.0
124     # Amplitude of the UV bump. For the Milky Way: 0.75
125     uv_bump_amplitude = 0.0
126     # Slope delta of the power law continuum.
127     powerlaw_slope = -0.7
128     # Filters for which the attenuation will be computed and added to
129     ↪ the
130     # SED information dictionary. You can give several filter names
131     # separated by a & (don't use commas).
132     filters = V_B90 & FUV
133
134     [[dale2014]]
135     # AGN fraction. It is not recommended to combine this AGN emission
136     ↪ with
137     # the of Fritz et al. (2006) models.
138     fracAGN = 0.0
139     # Alpha slope. Possible values are: 0.0625, 0.1250, 0.1875, 0.2500,
140     # 0.3125, 0.3750, 0.4375, 0.5000, 0.5625, 0.6250, 0.6875, 0.7500,

```

```

139     # 0.8125, 0.8750, 0.9375, 1.0000, 1.0625, 1.1250, 1.1875, 1.2500,
140     # 1.3125, 1.3750, 1.4375, 1.5000, 1.5625, 1.6250, 1.6875, 1.7500,
141     # 1.8125, 1.8750, 1.9375, 2.0000, 2.0625, 2.1250, 2.1875, 2.2500,
142     # 2.3125, 2.3750, 2.4375, 2.5000, 2.5625, 2.6250, 2.6875, 2.7500,
143     # 2.8125, 2.8750, 2.9375, 3.0000, 3.0625, 3.1250, 3.1875, 3.2500,
144     # 3.3125, 3.3750, 3.4375, 3.5000, 3.5625, 3.6250, 3.6875, 3.7500,
145     # 3.8125, 3.8750, 3.9375, 4.0000
146     alpha = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
147
148     [[redshifting]]
149     # Redshift of the objects. Leave empty to use the redshifts from the
150     # input file.
151     redshift =
152
153
154     # Configuration of the statistical analysis method.
155     [analysis_params]
156     # List of the physical properties to estimate. Leave empty to analyse
157     # all the physical properties (not recommended when there are many
158     # models).
159     variables = sfh.sfr, sfh.sfr10Myrs, sfh.sfr100Myrs, stellar.m_star,
160     ↪ attenuation.FUV, attenuation.V_B90, dust.luminosity, sfh.tau_main,
161     ↪ sfh.age
162     # List of bands for which to estimate the fluxes. Note that this is
163     # independent from the fluxes actually fitted to estimate the physical
164     # properties.
165     bands = sdss.up, sdss.gp, sdss.rp, sdss.ip, sdss.zp
166     # If true, save the best SED for each observation to a file.
167     save_best_sed = True
168     # Save the raw chi2. It occupies ~15 MB/million models/variable.
169     ↪ Allowed
170     # values are 'all', 'none', 'properties', and 'fluxes'.

```

```
168 save_chi2 = none
169 # If true, for each object check whether upper limits are present and
170 # analyse them.
171 lim_flag = False
172 # If true, for each object we create a mock object and analyse them.
173 mock_flag = False
174 # When redshifts are not given explicitly in the redshifting module,
175 # number of decimals to round the observed redshifts to compute the
    ↪ grid
176 # of models. To disable rounding give a negative value. Do not round
    ↪ if
177 # you use narrow-band filters.
178 redshift_decimals = 2
179 # Number of blocks to compute the models and analyse the observations.
180 # If there is enough memory, we strongly recommend this to be set to
    ↪ 1.
181 blocks = 1
```


Apêndice C

Parâmetros de entrada utilizados no CIGALE para a avaliação final

A seguir os valores utilizados em cada módulo quando este estava sendo avaliado com os dados de galáxias da *Blue Cloud*.

```
1  [[sfh2exp]]
2      # e-folding time of the main stellar population model in Myr.
3      tau_main = 300, 500, 1000, 10000
4      # e-folding time of the late starburst population model in Myr.
5      tau_burst = 50.0
6      # Mass fraction of the late burst population.
7      f_burst = 0.0
8      # Age of the main stellar population in the galaxy in Myr. The
9      ↪ precision
10     # is 1 Myr.
11     age = 250, 1000, 5000, 12000
12     # Age of the late burst in Myr. The precision is 1 Myr.
13     burst_age = 250
14     # Value of SFR at t = 0 in M_sun/yr.
15     sfr_0 = 1.0
16     # Normalise the SFH to produce one solar mass.
17     normalise = True
18  [[sfhdelayed]]
```

```

19  # e-folding time of the main stellar population model in Myr.
20  tau_main = 300, 500, 1000, 10000
21  # Age of the main stellar population in the galaxy in Myr. The
    ↪ precision
22  # is 1 Myr.
23  age_main = 250, 1000, 5000, 12000
24  # e-folding time of the late starburst population model in Myr.
25  tau_burst = 50.0
26  # Age of the late burst in Myr. The precision is 1 Myr.
27  age_burst = 20
28  # Mass fraction of the late burst population.
29  f_burst = 0.0
30  # Multiplicative factor controlling the SFR if normalise is False.
    ↪ For
31  # instance without any burst:
    ↪  $SFR(t) = sfr\_A \times t \times \exp(-t/\tau) / \tau^2 f$ 
32  sfr_A = 1.0
33  # Normalise the SFH to produce one solar mass.
34  normalise = True
35
36  [[bc03]]
37  # Initial mass function: 0 (Salpeter) or 1 (Chabrier).
38  imf = 0 (ou 1)
39  # Metallicity. Possible values are: 0.0001, 0.0004, 0.004, 0.008,
    ↪ 0.02,
40  # 0.05.
41  metallicity = 0.0004, 0.008, 0.02, 0.05
42  # Age [Myr] of the separation between the young and the old star
43  # populations. The default value is 107 years (10 Myr). Set to 0 not
    ↪ to
44  # differentiate ages (only an old population).
45  separation_age = 10

```



```
46
47 [[m2005]]
48     # Initial mass function: 0 (Salpeter) or 1 (Kroupa)
49     imf = 0 (ou 1)
50     # Metallicity. Possible values are: 0.001, 0.01, 0.02, 0.04.
51     metallicity = 0.001, 0.01, 0.02, 0.04
52     # Age [Myr] of the separation between the young and the old star
53     # populations. The default value is 107 years (10 Myr). Set to 0 not
54     ↪ to
55     # differentiate ages (only an old population).
56     separation_age = 10
57
58 [[nebular]]
59     # Ionisation parameter
60     logU = -3.0, -2.0, -1.0
61     # Fraction of Lyman continuum photons escaping the galaxy
62     f_esc = 0.0, 0.5
63     # Fraction of Lyman continuum photons absorbed by dust
64     f_dust = 0.0, 0.3
65     # Line width in km/s
66     lines_width = 300.0
67     # Include nebular emission.
68     emission = True
69
70 [[dustatt_powerlaw]]
71     # V-band attenuation of the young population.
72     Av_young = 0.0, 3.0
73     # Reduction factor for the V-band attenuation of the old population
74     # compared to the young one (<1).
75     Av_old_factor = 0.44
76     # Central wavelength of the UV bump in nm.
77     uv_bump_wavelength = 217.5
```

```

77  # Width (FWHM) of the UV bump in nm.
78  uv_bump_width = 35.0
79  # Amplitude of the UV bump. For the Milky Way: 0.75
80  uv_bump_amplitude = 0.0, 3.0
81  # Slope delta of the power law continuum.
82  powerlaw_slope = -0.7
83  # Filters for which the attenuation will be computed and added to
   ↪ the
84  # SED information dictionary. You can give several filter names
85  # separated by a & (don't use commas).
86  filters = sdss.gp & sdss.rp
87
88  [[dustatt_modified_CF00]]
89  # V-band attenuation in the interstellar medium.
90  Av_ISM = 0.0, 3.0
91  # Av_ISM / (Av_BC+Av_ISM)
92  mu = 0.44
93  # Power law slope of the attenuation in the ISM.
94  slope_ISM = -0.7
95  # Power law slope of the attenuation in the birth clouds.
96  slope_BC = -1.3
97  # Filters for which the attenuation will be computed and added to
   ↪ the
98  # SED information dictionary. You can give several filter names
99  # separated by a & (don't use commas).
100 filters = sdss.gp & sdss.rp

```

Apêndice D

SEDs ajustadas para a pequena amostra de 15 galáxias

Apresenta-se aqui os ajustes de cada galáxia escolhida da subamostra, contendo 5 galáxias azuis, 5 vermelhas e 5 verdes.

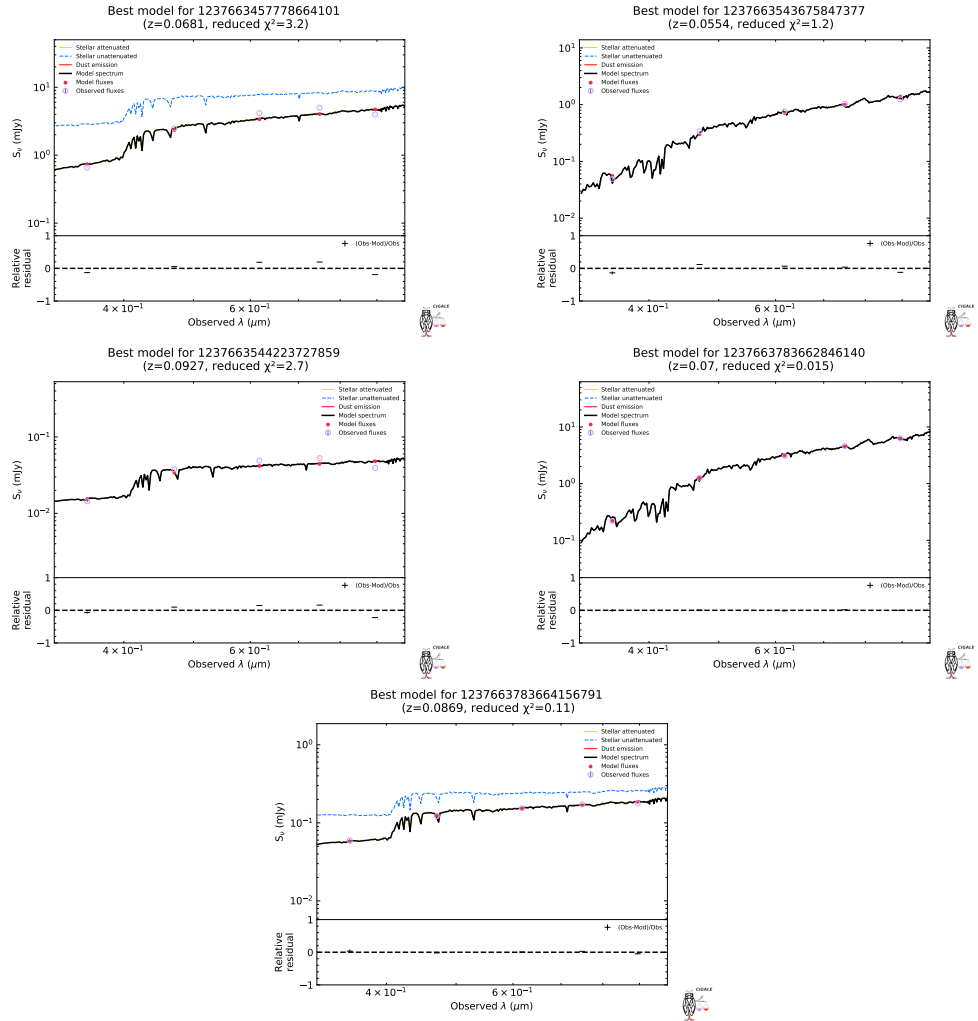


Figura D.1: SEDs ajustadas pelo código CIGALE para as galáxias do grupo “Red Sequence”.

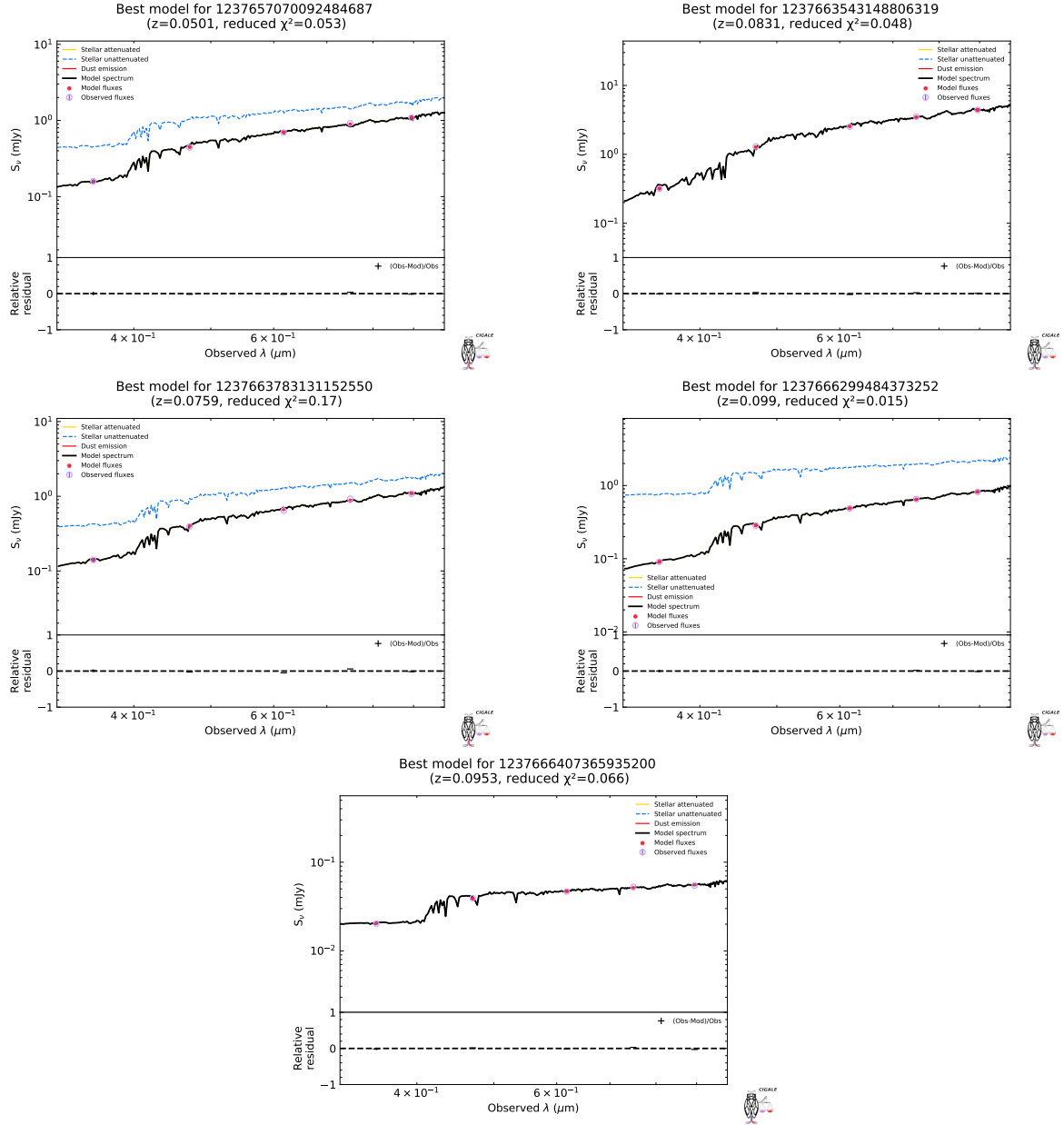


Figura D.2: SEDs ajustadas pelo código CIGALE para as galáxias do grupo “Green Valley”.

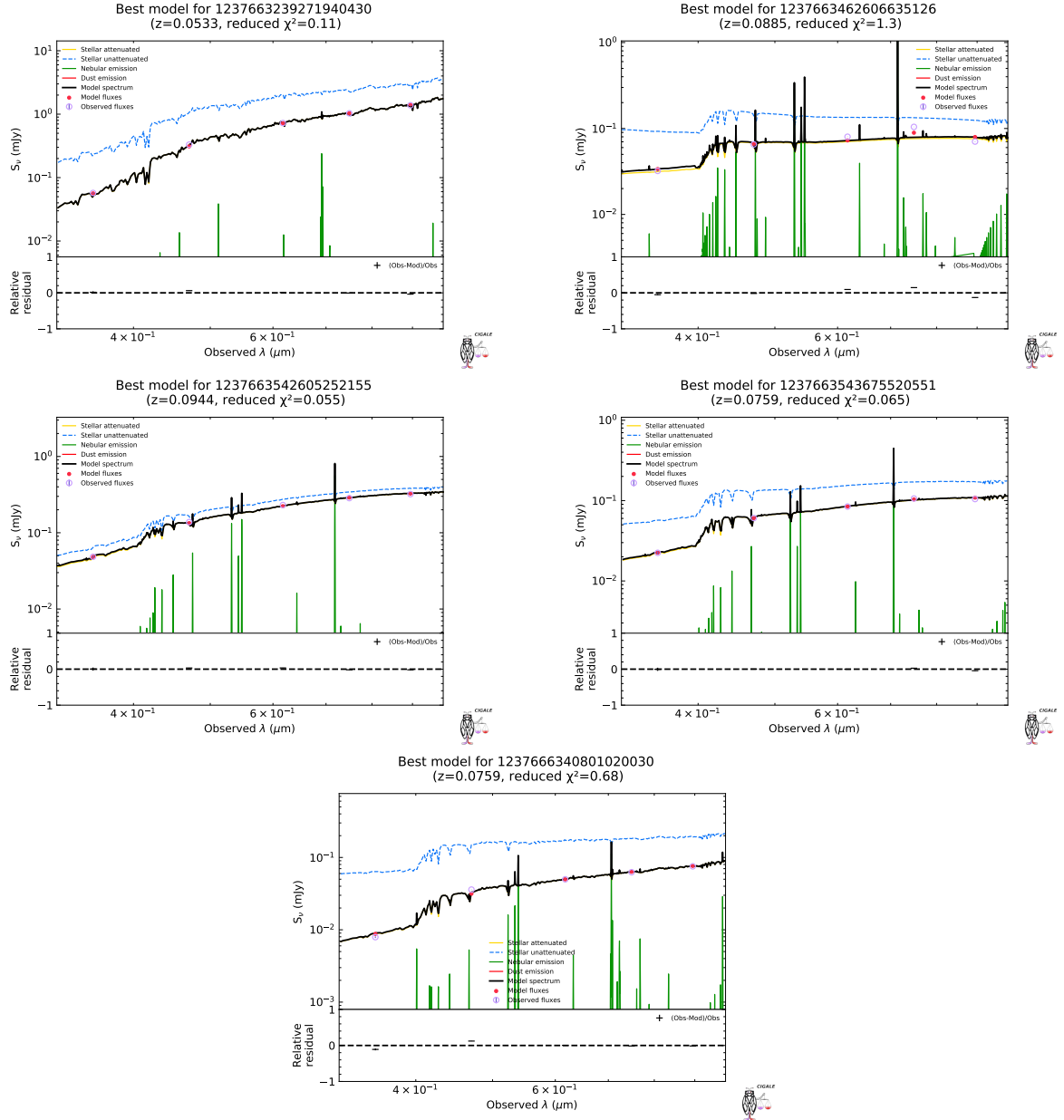


Figura D.3: SEDs ajustadas pelo código CIGALE para as galáxias do grupo “Blue Cloud”.

Apêndice E

Gráficos dos parâmetros de saída de cada configuração

Os gráficos com os parâmetros encontrados de cada configuração aplicada na amostra de galáxias da *Blue Cloud* apresentam-se a seguir:

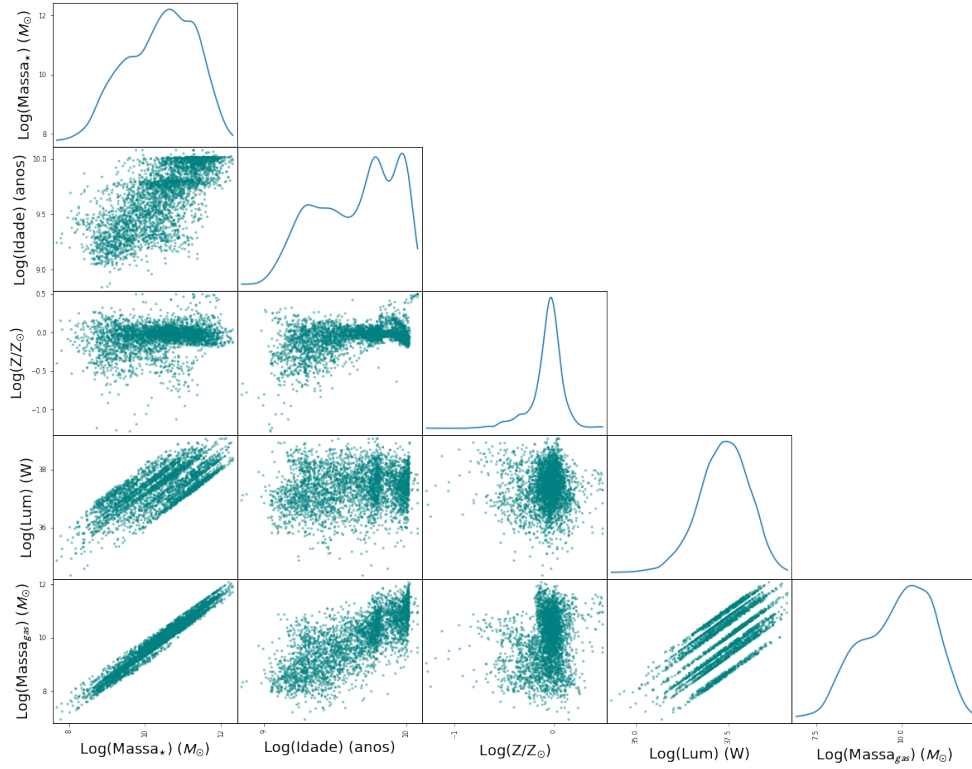


Figura E.1: Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração I (sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw)

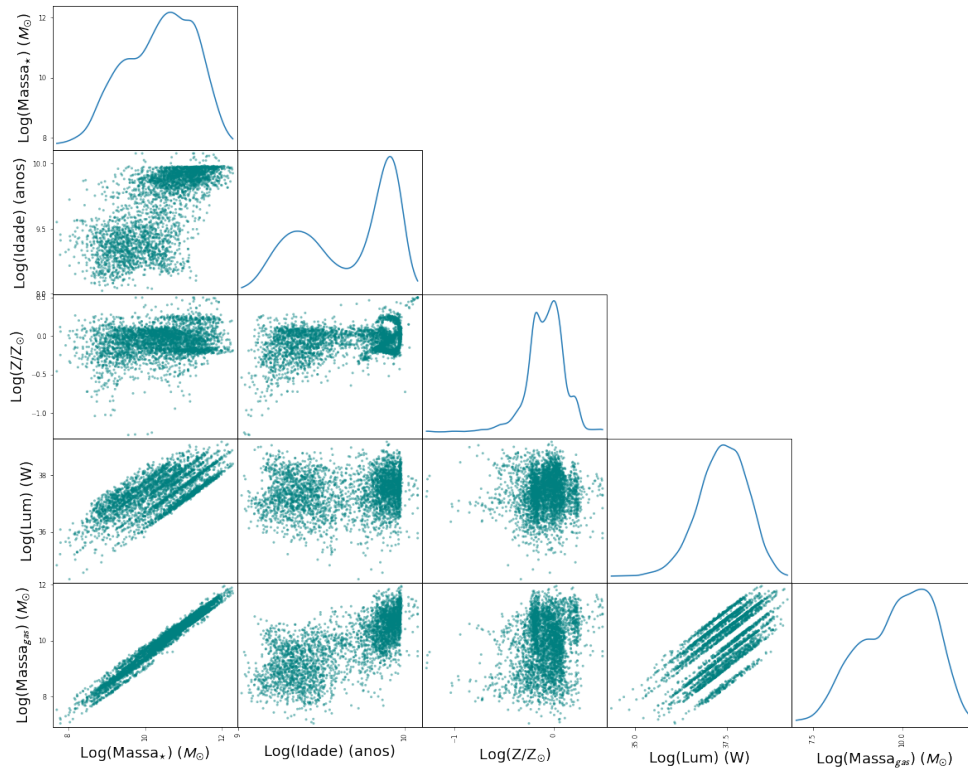


Figura E.2: Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração II (sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw).

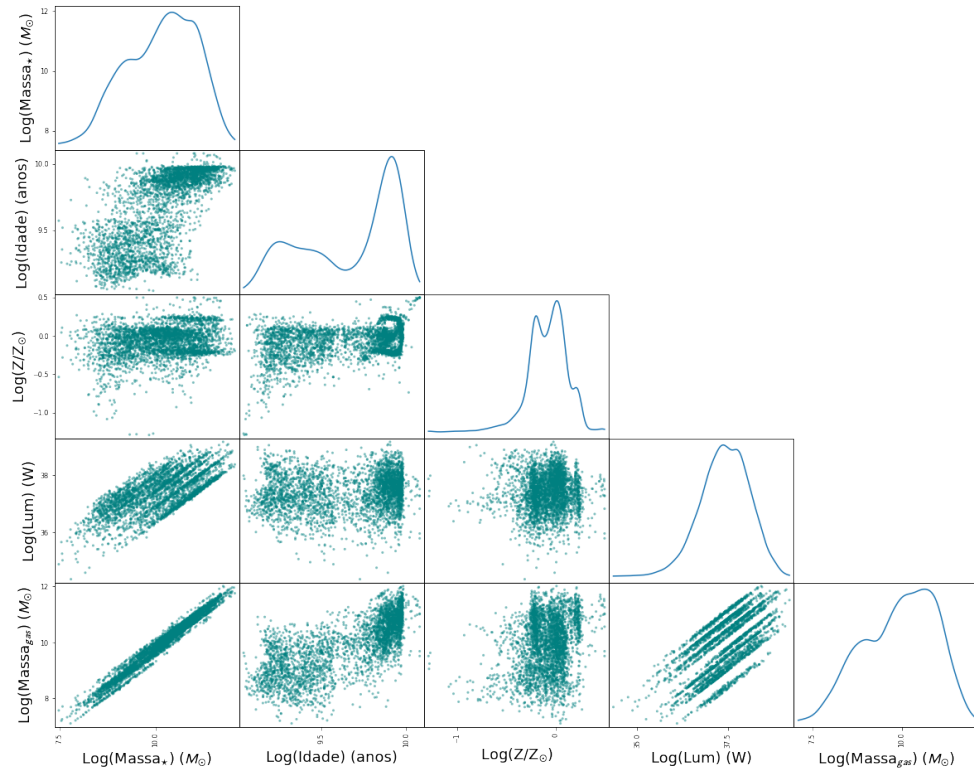


Figura E.3: Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração III (sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw).

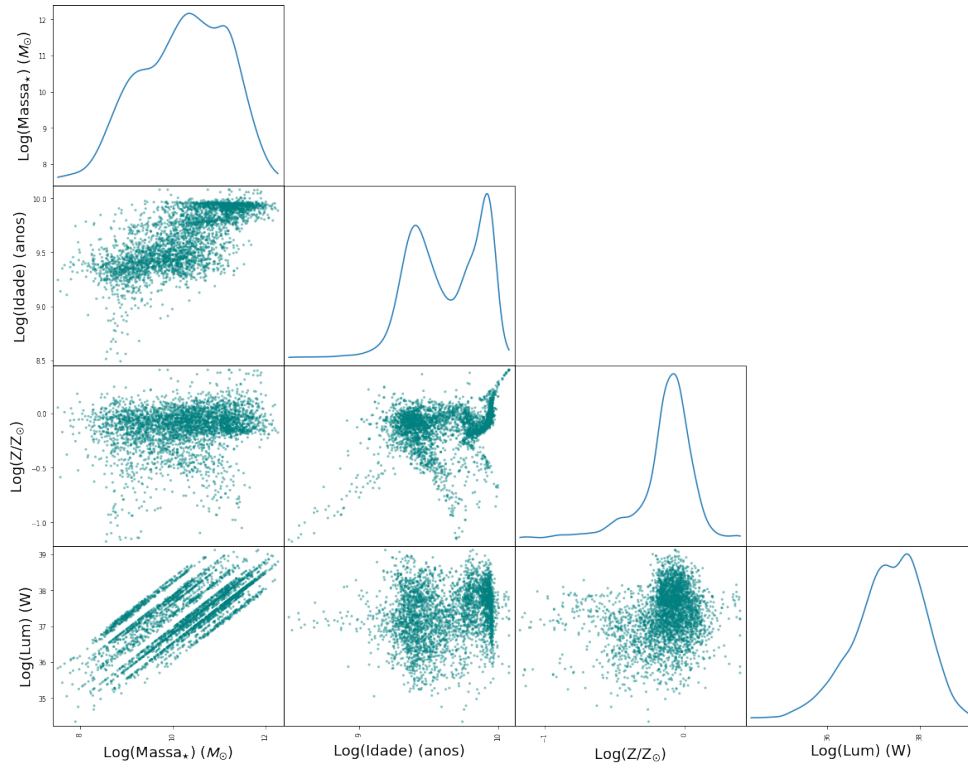


Figura E.4: Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração IV (sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw).

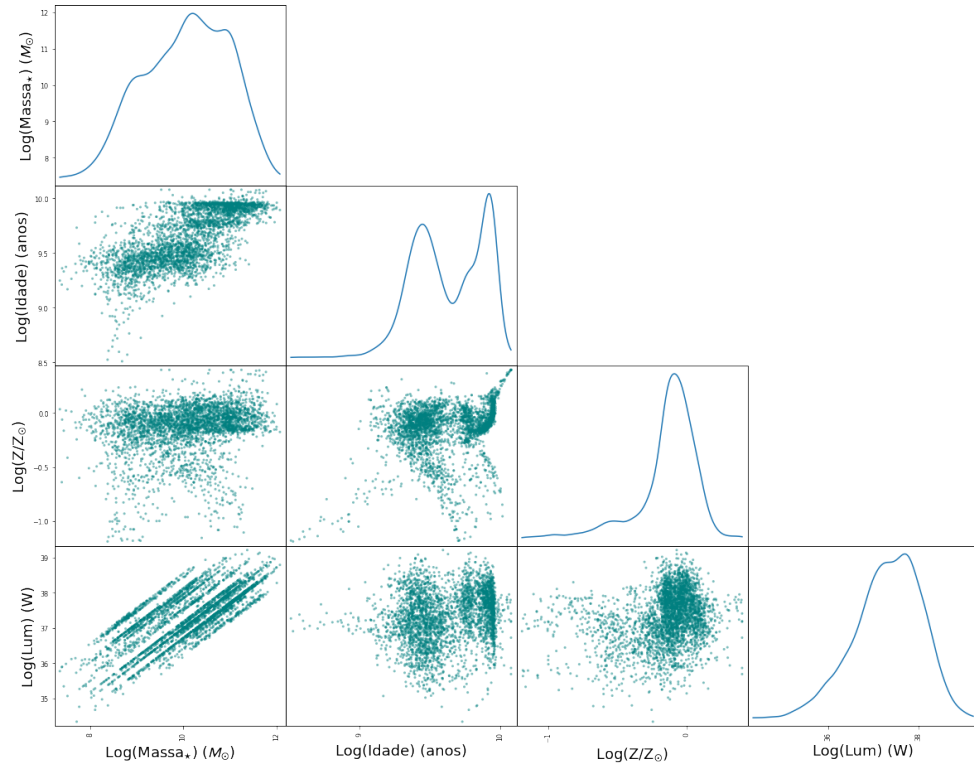


Figura E.5: Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração V (sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw).

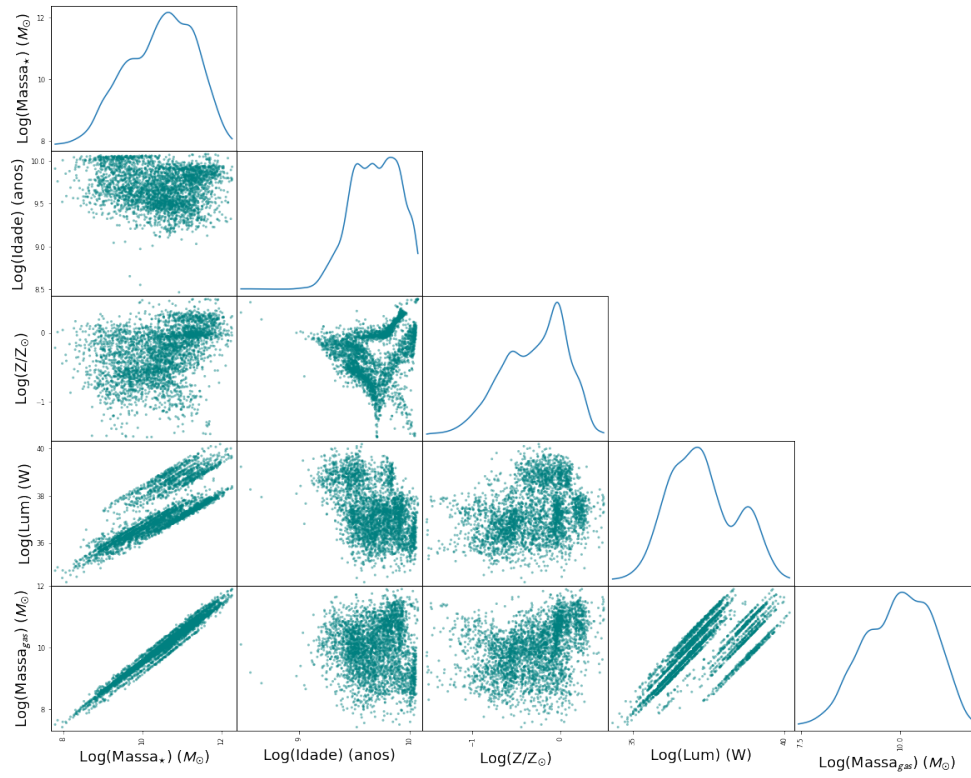


Figura E.6: Gráficos comparativos dos parâmetros de saída utilizando a configuração VI (sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00).

Apêndice F

Gráficos de comparação dos parâmetros de massa estelar e do gás de cada configuração.

A seguir, os gráficos de comparação dos parâmetros de massa estelar e massa do gás de cada configuração aplicada na amostra de galáxias da *Blue Cloud*.

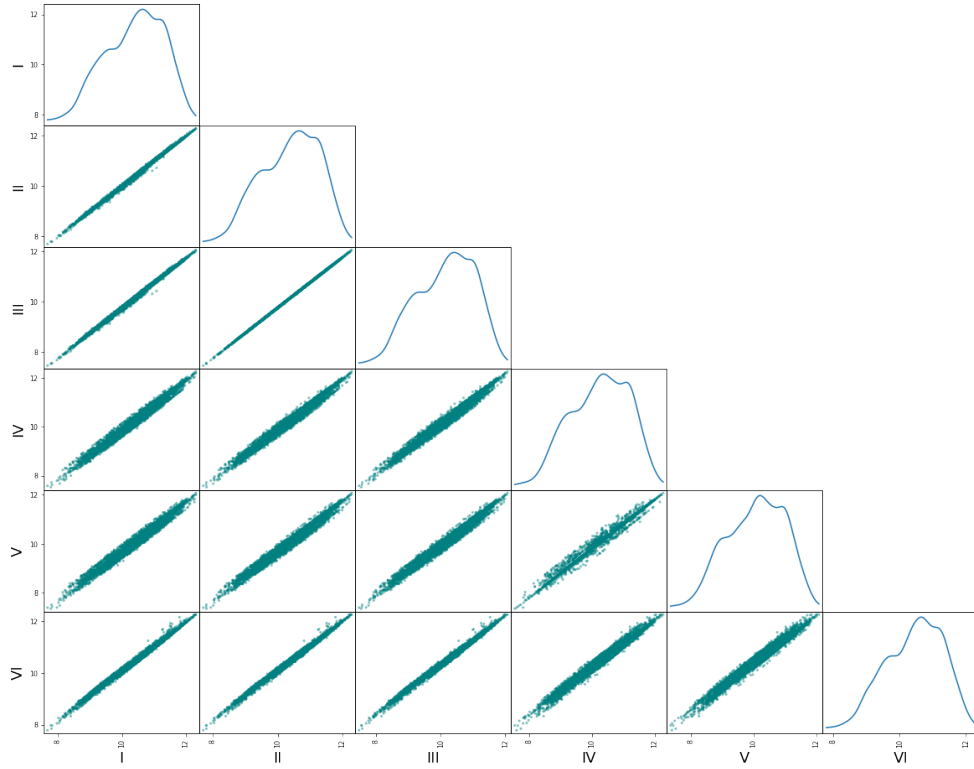


Figura F.1: Gráficos comparativos dos parâmetros de massa estelar encontrados para cada configuração. Os valores dos eixos representam $\log(\text{Massa}_\star)$ em $M_\odot$. As configurações são referentes aos seguintes modelos: I - sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; II - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; III - sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw; IV - sfhdelayed + m2005 (IMF Salpeter) + dustatt_powerlaw; V - sfhdelayed + m2005 (IMF Kroupa) + dustatt_powerlaw e VI - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.

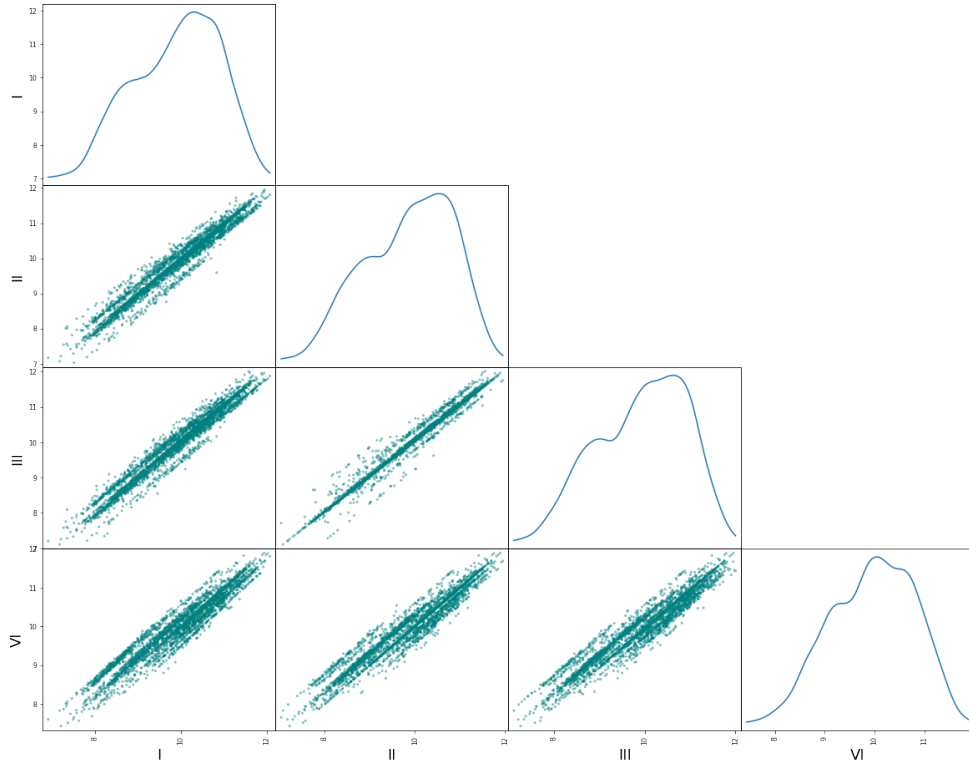


Figura F.2: Gráficos comparativos dos parâmetros de massa do gás encontrados para cada configuração. Os valores dos eixos representam $\log(\text{Massa}_{\text{gas}})$ em $M_{\odot}$. As configurações são referentes aos seguintes modelos: I - sfh2exp + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; II - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_powerlaw; III - sfhdelayed + bc03 (IMF Chabrier) + nebular + dustatt_powerlaw e VI - sfhdelayed + bc03 (IMF Salpeter) + nebular + dustatt_modified_CF00.