

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Física

**Análise de cinemática e formação estelar no  
*green valley* com espectroscopia de campo  
integral**

**Felícia de Aguiar Palacios**

Porto Alegre

2023

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Física

**Análise de cinemática e formação estelar no *green valley* com espectroscopia de campo integral**

**Felícia de Aguiar Palacios**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como requisito necessário para obtenção do grau  
de Bacharel em Física com ênfase em Astrofísica.  
**Orientador: Allan Schnorr Müller**

Porto Alegre  
2023

# Agradecimentos

Pelo apoio durante a minha graduação e a realização deste trabalho, agradeço a meus pais, Aline e Rubens, e a meu padrasto Luiz Claudio; a meus irmãos Guilherme e Antônio; a minhas amigas e colegas de pesquisa, as duas Carols; a meus amigos Ana Gabriela e Alexandre; e a meu companheiro Pablo.

Pela companhia nos últimos dias, agradeço ao Gato.

*"To be whole is to be part; true  
voyage is return"*

Ursula K. Le Guin, *The  
Dispossessed*

# Resumo

Em um diagrama de massa–taxa de formação estelar, galáxias com formação estelar ativa concentram-se na sequência principal, e aquelas que pararam de formar estrelas na sequência passiva. O *green valley* está situado entre essas duas regiões do diagrama, e é populado por galáxias com propriedades intermediárias. Acredita-se que essas galáxias passam por processos que reduzem sua formação estelar, transicionando da sequência principal para a sequência passiva. Estudos indicam que essa transição é acompanhada por transformações morfológicas. A fim de determinar se a transformação morfológica que ocorre no *green valley* está relacionada à formação estelar ou a reorganização das órbitas das estrelas, e estabelecer vínculos para os processos físicos que levam à cessação da formação estelar, utilizamos dados de espectroscopia de campo integral do levantamento astronômico MaNGA para obter propriedades cinemáticas e de formação estelar de galáxias do *green valley*, e as comparamos com as das sequências principal e das passivas.

**Palavras-chave:** *green valley*, evolução de galáxias, espectroscopia de campo integral

# Abstract

In a mass–star formation rate diagram, galaxies with active star formation concentrate on the main sequence, and those that have stopped forming stars are on the passive sequence. The green valley is situated between these two regions of the diagram and is populated by galaxies with intermediate properties. It is believed that these galaxies undergo processes that reduce their star formation, transitioning from the main sequence to the passive sequence. Studies indicate that this transition is accompanied by morphological transformations. In order to determine whether the morphological transformation that occurs in the green valley is related to star formation or the reorganization of stellar orbits, and to establish constraints to the physical processes leading to the cessation of star formation, we used data from the integral field spectroscopy survey MaNGA to obtain kinematic and star formation properties of green valley galaxies and compared them to those of the main and passive sequences.

**Keywords:** green valley, galaxy evolution, integral field spectroscopy

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Morfologia, cinemática e espectroscopia de campo integral	2
1.2	Objetivos	3
<b>2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>4</b>
2.1	Seleção da amostra	4
2.2	Parâmetros cinemáticos	5
2.3	Definição das classes cinemáticas	6
2.4	Obtenção de propriedades de populações estelares	6
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>8</b>
3.1	Classes cinemáticas	8
3.2	Propriedades de populações estelares	10
<b>4</b>	<b>Discussão</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>27</b>
	<b>Referências</b>	<b>28</b>
<b>A</b>	<b>Apêndice: Exemplos de galáxias de cada classe cinemática</b>	<b>30</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – A sequência de Hubble, separando galáxias em espirais e elípticas de acordo com sua morfologia. Fonte: Hubble (1937). . . . .	1
Figura 1.2 – CMD UV-óptico, com regiões correspondentes à sequência principal, à sequência das passivas e ao <i>green valley</i> . Fonte: Salim (2015) . . . . .	2
Figura 1.3 – <i>Slow rotators</i> (em vermelho) se encontram em uma região delimitada pela relação descrita na equação 1.1, enquanto <i>fast rotators</i> (demais) ocupam uma grande região do diagrama $\lambda_{Re}-\epsilon$ . Fonte: Cappellari (2016). . . . .	3
Figura 2.1 – As regiões do <i>green valley</i> (em verde), sequência principal (em azul) e sequência das passivas (em vermelho) definidas de acordo com Trussler et al. (2020). . . . .	4
Figura 2.2 – Distribuição de $\log(V/\sigma)$ de galáxias <i>fast rotators</i> para diferentes <i>bins</i> de massa, usada para separá-las em discos dinamicamente frios e sistemas intermediários. A linha vertical indica o limite entre a população de discos dinamicamente frios (à direita da linha) e sistemas indermediários. . . . .	7
Figura 3.1 – Distribuição de $V/\sigma$ de galáxias centrais para diferentes <i>bins</i> de massa. . . . .	9
Figura 3.2 – Distribuição de $V/\sigma$ de galáxias satélites para diferentes <i>bins</i> de massa. . . . .	9
Figura 3.3 – Exemplos de imagens do SDSS de galáxias centrais com $\log 10 < (M/M_{\odot}) < 11$ de cada classe cinemática. . . . .	11
Figura 3.4 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais com $\log(M/M_{\odot}) < 10$ . . . . .	12
Figura 3.5 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais com $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ . . . . .	13
Figura 3.6 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais com $\log(M/M_{\odot}) > 11$ . . . . .	13
Figura 3.7 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais com $\log(M/M_{\odot}) < 10$ . . . . .	14
Figura 3.8 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais com $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ . . . . .	14
Figura 3.9 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais com $\log(M/M_{\odot}) > 11$ . . . . .	15
Figura 3.10–Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias satélites com $\log(M/M_{\odot}) < 10$ . . . . .	15
Figura 3.11–Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias satélites com $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ . . . . .	16
Figura 3.12–Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias satélites com $\log(M/M_{\odot}) > 11$ . . . . .	16



---

Figura 3.13–Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias satélites com $\log (M/M_\odot) < 10$ . . . . .	17
Figura 3.14–Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias satélites com $10 < \log (M/M_\odot) < 11$ . . . . .	17
Figura 3.15–Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias satélites com $\log (M/M_\odot) > 11$ . . . . .	18
Figura 3.16–Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do <i>green valley</i> com massa $\log (M/M_\odot) < 10$ . . . . .	18
Figura 3.17–Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do <i>green valley</i> com massa $10 < \log (M/M_\odot) < 11$ . . . . .	19
Figura 3.18–Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do <i>green valley</i> com massa $\log (M/M_\odot) > 11$ . . . . .	19
Figura 3.19–Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do <i>green valley</i> com massa $\log (M/M_\odot) < 10$ . . . . .	20
Figura 3.20–Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do <i>green valley</i> com massa $10 < \log (M/M_\odot) < 11$ . . . . .	20
Figura 3.21–Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do <i>green valley</i> com massa $\log (M/M_\odot) > 11$ . . . . .	21
Figura 3.22–Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias centrais do <i>green valley</i> com $\log(M/M_\odot) < 10$ . . . . .	21
Figura 3.23–Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias centrais do <i>green valley</i> com $10 < \log(M/M_\odot) < 11$ . . . . .	22
Figura 3.24–Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias centrais do <i>green valley</i> com $\log(M/M_\odot) > 11$ . . . . .	22
Figura 3.25–Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias satélites do <i>green valley</i> com $\log(M/M_\odot) < 10$ . . . . .	23
Figura 3.26–Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias satélites do <i>green valley</i> com $10 < \log(M/M_\odot) < 11$ . . . . .	23
Figura 3.27–Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias satélites do <i>green valley</i> com $\log(M/M_\odot) > 11$ . . . . .	24
Figura A.1–Exemplos de imagens do SDSS de galáxias centrais com $\log (M/M_\odot) < 10$ de cada classe cinemática. . . . .	30
Figura A.2–Exemplos de imagens do SDSS de galáxias centrais com $\log (M/M_\odot) > 11$ de cada classe cinemática. . . . .	31

---

Figura A.3–Exemplos de imagens do SDSS de galáxias satélites com $\log (M/M_{\odot}) < 10$ de cada classe cinemática. . . . .	32
Figura A.4–Exemplos de imagens do SDSS de galáxias satélites com $10 < \log (M/M_{\odot}) < 11$ de cada classe cinemática. . . . .	33
Figura A.5–Exemplos de imagens do SDSS de galáxias satélites com $\log (M/M_{\odot}) > 11$ de cada classe cinemática. . . . .	34

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Frações de classes cinemáticas de galáxias centrais. . . . .	8
Tabela 2 – Frações de classes cinemáticas de galáxias satélites. . . . .	8

# 1 Introdução

Galáxias podem ser separadas em diferentes classes morfológicas de acordo com sua forma visual. A sequência de Hubble, um sistema de classificação morfológica amplamente utilizado na astronomia, divide galáxias em *late type* (espirais) e *early type* (elípticas). O contraste na morfologia também é acompanhado por bimodalidades em diversas propriedades como cor (galáxias *late type* são em sua maioria azuis e galáxias *early type*, vermelhas), luminosidade (galáxias *early type* são tipicamente mais luminosas) e o ambiente no qual se encontram (galáxias *early type* estão, em média, localizadas em ambientes mais densos) (Blanton e Moustakas, 2009).

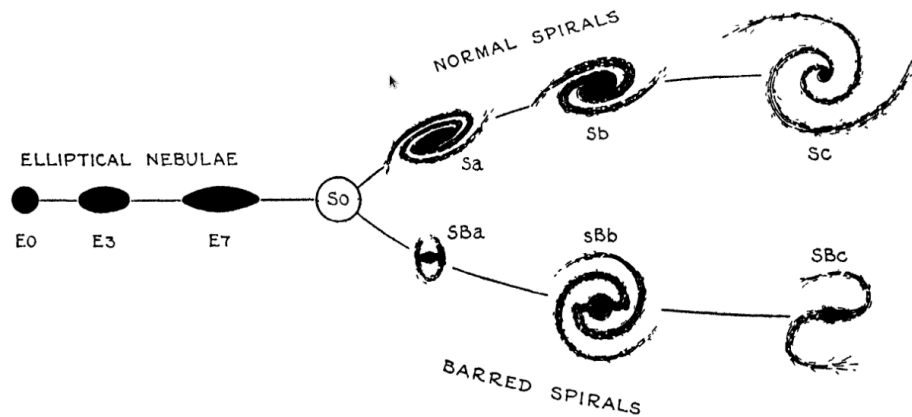


Figura 1.1 – A sequência de Hubble, separando galáxias em espirais e elípticas de acordo com sua morfologia. Fonte: Hubble (1937).

Uma outra forma de explorar diferenças entre as classes de galáxias é através de diagramas cor-magnitude (CMD). CMDs ópticos de galáxias do universo local apresentam duas regiões de maior concentração: a *blue cloud* e a *red sequence*. Na *blue cloud* encontram-se principalmente galáxias azuis espirais, e na *red sequence*, galáxias vermelhas elípticas e lenticulares. Como mostra a figura 1.2, usando fotometria em comprimentos de onda ultravioleta (UV), é possível identificar uma região intermediária no CMD UV-óptico (Wyder et al., 2007). Essa região é denominada *green valley*.

De forma equivalente, existe uma bimodalidade na distribuições de galáxias em um diagrama de massa-taxa de formação estelar, com galáxias com formação estelar ativa na sequência principal e galáxias cuja formação estelar cessou na sequência passiva. Esse diagrama também apresenta uma região intermediária, correspondente ao *green valley* identificado através do CMD (Salim et al., 2007).

O *green valley* é populado por galáxias com propriedades intermediárias (Salim, 2015). Acredita-se que galáxias atravessam o *green valley* enquanto passam por processos que

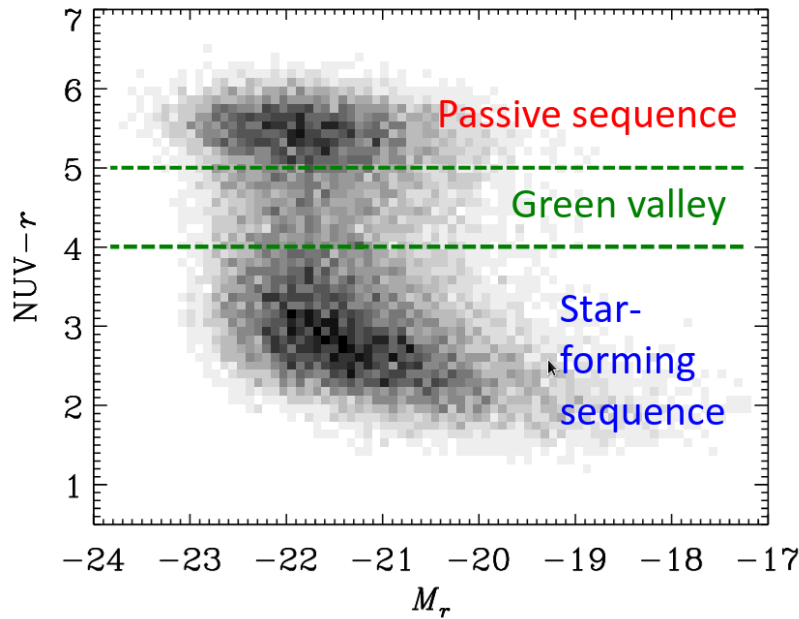


Figura 1.2 – CMD UV-óptico, com regiões correspondentes à sequência principal, à sequência das passivas e ao *green valley*. Fonte: Salim (2015)

reduzem sua taxa de formação estelar, transicionando da sequência principal para a sequência das passivas. Estudos sugerem que essa diminuição na taxa de formação estelar é acompanhada por uma transformação morfológica (Gu et al., 2018). Entender como acontece essa transição é de grande importância para o estudo de evolução de galáxias.

## 1.1 Morfologia, cinemática e espectroscopia de campo integral

A classificação morfológica, tipicamente feita de forma visual ou através de decomposição bojo/disco, apresenta algumas incertezas. Em baixas inclinações, não é possível distinguir estruturas discoidais e elípticas, e estruturas espirais como barras e anéis podem contribuir para a concentração central de luz, indicando falsamente a presença de bojos.

Parâmetros cinemáticos podem ser usados para quebrar degenerescências da classificação morfológica (Fraser-McKelvie e Cortese, 2022). Em discos, o movimento orbital das estrelas é principalmente rotacional, com alto momento angular e baixa dispersão, e em bojos ou outras estruturas esferoidais, a dispersão de velocidades é a componente dominante do movimento.

De levantamentos astronômicos de espectroscopia de campo integral obtem-se propriedades cinemáticas espacialmente resolvidas, que permitem a quantificação do movimento das estrelas e a determinação do grau de suporte rotacional ou dispersional.

Usando o spin estelar dentro de 1 raio efetivo,  $\lambda_{Re}$ , e a elipticidade  $\epsilon$  é possível separar galáxias em duas classes cinemáticas distintas, *slow rotators* e *fast rotators*. As *slow rotators* obedecem a seguinte relação (Cappellari, 2016):

$$\lambda_{Re} < 0.08 + \epsilon/4, \text{ com } \epsilon < 0.4. \quad (1.1)$$

As demais, classificadas como *fast rotators*, ocupam a região restante do diagrama  $\lambda-\epsilon$ , apresentando uma grande variedade de valores de  $\lambda_{Re}$ . Isso pode ser visto na figura 1.3.

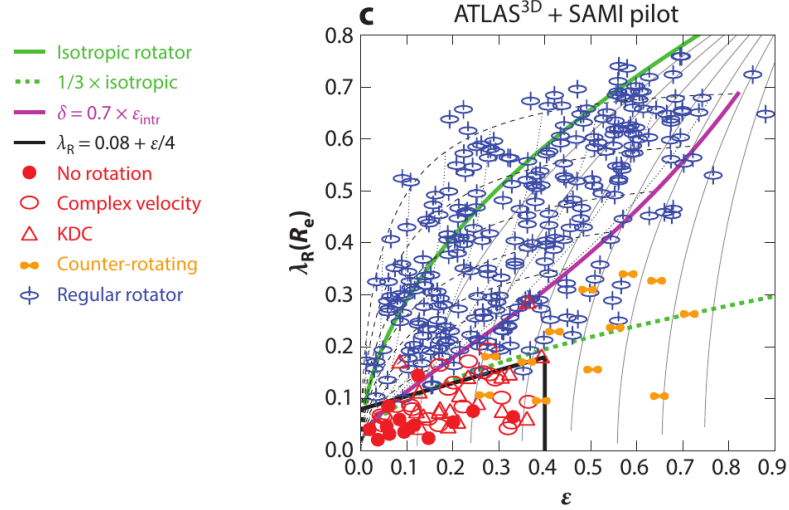


Figura 1.3 – *Slow rotators* (em vermelho) se encontram em uma região delimitada pela relação descrita na equação 1.1, enquanto *fast rotators* (demais) ocupam uma grande região do diagrama  $\lambda_{Re}-\epsilon$ . Fonte: Cappellari (2016).

A razão entre a velocidade de rotação e a dispersão de velocidades das estrelas,  $V/\sigma$ , pode ser usada para quantificar a dominância de suporte rotacional ou dispersional. Para altos valores de  $V/\sigma$ , a estrutura é dominada por rotação, e apresenta morfologia discoidal, e para baixos valores, é dominada por dispersão e apresenta morfologia esferoidal.

Fraser-McKelvie e Cortese (2022) usam  $V/\sigma$  para definir duas classes de *fast rotators* de acordo com o grau de suporte rotacional: discos dinamicamente frios, estruturas com maior dominância de rotação, e intermediários, que incluem galáxias com discos espessos, com bojos proeminentes ou outras estruturas dominadas por dispersão que contribuem para a diminuição do valor de  $V/\sigma$ .

## 1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é estudar a cinemática e as propriedades das populações estelares de galáxias do *green valley*, comparando-as com galáxias das sequências principal e passiva, a fim de estabelecer vínculos para os processos físicos que levam à cessação da formação estelar, e explorar a relação destes com a cinemática. Para isso, utilizamos dados de espectroscopia de campo integral, que permitem o estudo espacialmente resolvido dessas propriedades. Desta forma, é possível estabelecer o efeito do processo de redução da taxa de formação estelar em diferentes regiões da galáxia.

## 2 Metodologia

### 2.1 Seleção da amostra

Definimos o *green valley* como a região no diagrama massa–taxa de formação estelar delimitada pelas seguintes retas:

$$\log(SFR/M_{\odot}\text{yr}^{-1}) = 0.7 \log(M_*/M_{\odot}) - 7.52 \quad (2.1)$$

$$\log(SFR/M_{\odot}\text{yr}^{-1}) = 0.7 \log(M_*/M_{\odot}) - 8.02 \quad (2.2)$$

como em Trussler et al. (2020). Os dados de massa estelar e taxa de formação estelar foram retirados do catálogo GALEX-SDSS-WISE Legacy Catalog (GSWLC; Salim et al., 2016), que contém propriedades físicas de aproximadamente 700000 galáxias. As massas e taxas de formação estelar foram obtidas a partir de dados dos levantamentos astronômicos SDSS, GALEX e WISE através de SED *fitting*.

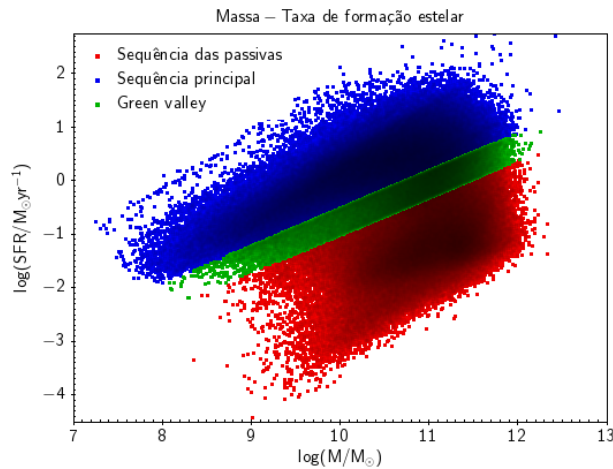


Figura 2.1 – As regiões do *green valley* (em verde), sequência principal (em azul) e sequência das passivas (em vermelho) definidas de acordo com Trussler et al. (2020).

Separamos as galáxias da amostra em centrais e satélites de acordo com a classificação do catálogo de grupos de Lim et al. (2017). Isso foi feito pois galáxias satélites podem ter sua taxa de formação estelar afetada pelo ambiente, o que não acontece para galáxias centrais.

Foram selecionadas aquelas galáxias contidas no levantamento astronômico de espectroscopia de campo integral MaNGA. O MaNGA obteve medidas espectroscópicas espacialmente resolvidas de aproximadamente 10000 galáxias com massas estelares  $M > 10^9 M_{\odot}$  divididas em duas amostras, uma com cobertura radial de até  $1.5 R_e$  correspondendo a 67% da amostra total, e restante com cobertura radial de  $2.5 R_e$ . As galáxias do MaNGA foram selecionadas a partir do catálogo espectroscópico do SDSS, e são limitadas por

*redshift* para garantir que o tamanho angular das galáxias observadas seja contido pelo campo de visão do instrumento. O limite do *redshift* aumenta com a magnitude absoluta na banda  $i$ , pois galáxias mais luminosas tendem a ter tamanhos maiores. A amostra do MaNGA apresenta distribuição constante de massa estelar (Bundy et al., 2014).

Nossa amostra final contém 738 galáxias centrais e 435 galáxias satélites, com massas estelares entre  $10^9 M_\odot$  e  $10^{11.7} M_\odot$  e *redshifts* entre 0.02 e 0.1. As amostras de controle da sequência principal e das passivas, também divididas em centrais e satélites, compostas por galáxias com  $\log SFR > 0.07 \log M_* - 7.52$  e  $\log SFR < 0.07 \log M_* - 8.02$  respectivamente, foram selecionadas de forma que as distribuições de massa estelar e *redshift* sejam as mesmas para todas as amostras.

## 2.2 Parâmetros cinemáticos

Utilizamos mapas 2D de fluxo, velocidade e dispersão de velocidades estelar do MaNGA para calcular parâmetros cinemáticos integrados. As propriedades de cinemática estelar do MaNGA são obtidas pelo ajuste de modelos espectrais com o algoritmo pPXF (Westfall et al., 2019).

Obtivemos a razão integrada entre velocidade e dispersão de velocidades estelares,  $V/\sigma$ , definido de acordo com a expressão abaixo, como em Fraser-McKelvie e Cortese (2022):

$$\left(\frac{V}{\sigma}\right)^2 = \frac{\langle V^2 \rangle}{\langle \sigma^2 \rangle} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{spx}} F_i V_i^2}{\sum_{i=0}^{N_{spx}} F_i \sigma_i^2} \quad (2.3)$$

Onde  $N_{spx}$  é o número de spaxels,  $F$  é o fluxo médio na banda  $r$  para cada spaxel,  $R$  é o semieixo maior da elipse na qual se encontra o spaxel,  $V$  é a velocidade rotacional estelar e  $\sigma$  é a dispersão de velocidades estelar.

Também obtivemos  $\lambda_{R_e}$  utilizando a seguinte expressão (Fraser-McKelvie e Cortese, 2022):

$$\lambda_R = \frac{\langle R|V| \rangle}{R\sqrt{V^2 + \sigma^2}} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{spx}} F_i R_i |V_i|}{\sum_{i=0}^{N_{spx}} F_i R_i \sqrt{V_i^2 + \sigma_i^2}} \quad (2.4)$$

Tanto para a obtenção de  $V/\sigma$  quanto para a de  $\lambda_R$  foram mascarados os spaxels com dispersão de velocidades  $\sigma$  inferiores a  $50 \text{ km s}^{-1}$ . Galáxias com mais de 20% de spaxels mascarados dentro de  $1R_e$  foram excluídas da amostra.

Condições atmosféricas e efeitos de abertura afetam medições cinemáticas, causando aparente diminuição da velocidade na linha de visada e aumento da dispersão. Esse efeito é denominado *beam smearing*. Foi aplicada uma correção para *beam smearing* de acordo com a metodologia descrita em Harborne et al. (2020).



## 2.3 Definição das classes cinemáticas

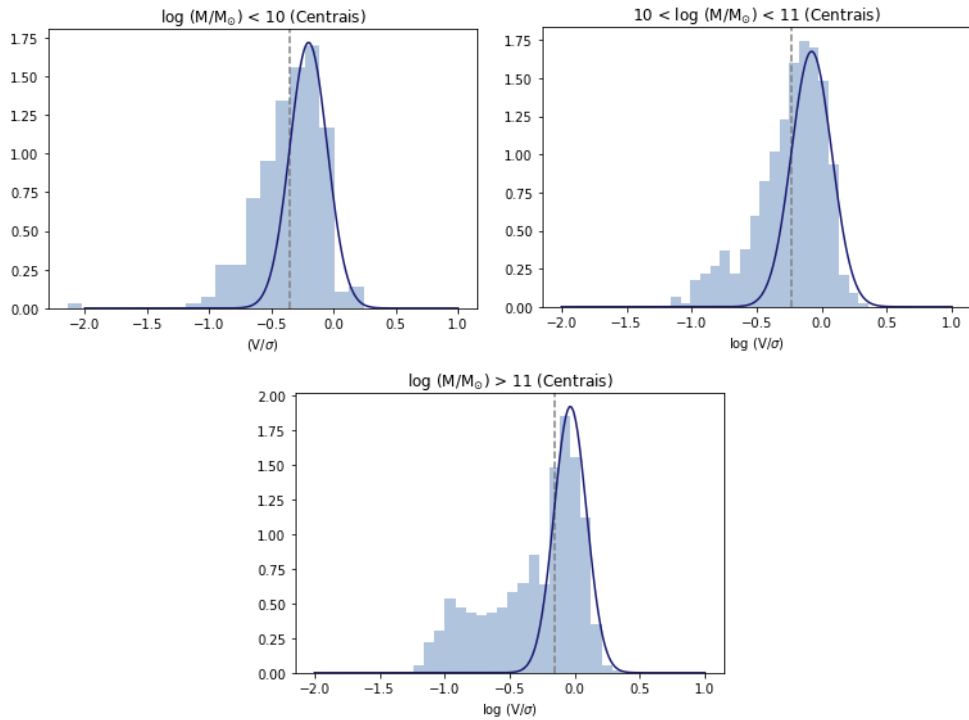
Esses parâmetros foram usados para separar as galáxias da amostra em diferentes classes cinemáticas. As galáxias que obedecem a relação descrita na expressão 1.1 são classificadas como *slow rotators*, e as demais como *fast rotators*.

As *fast rotators* são ainda divididas em discos dinamicamente frios e sistemas intermediários utilizando a distribuição de  $\log(V/\sigma)$  em três *bins* de massa estelar ( $\log(M/M_\odot) < 10$ ,  $10 < \log(M/M_\odot) < 11$ ,  $\log(M/M_\odot) > 11$ ), como é possível ver na figura 2.2. Para todos os *bins* de massa, a distribuição apresenta um pico em torno de  $\log(V/\sigma) \approx 0$ , e uma cauda se estendendo para valores menores de  $\log(V/\sigma)$ . Foram ajustadas duas gaussianas à distribuição, e o valor de corte para a população de discos dinamicamente frios foi definido como  $-\sigma$  a partir do centro da distribuição com maiores valores de  $\log(V/\sigma)$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão da distribuição. As demais *fast rotators* foram classificadas como sistemas intermediários.

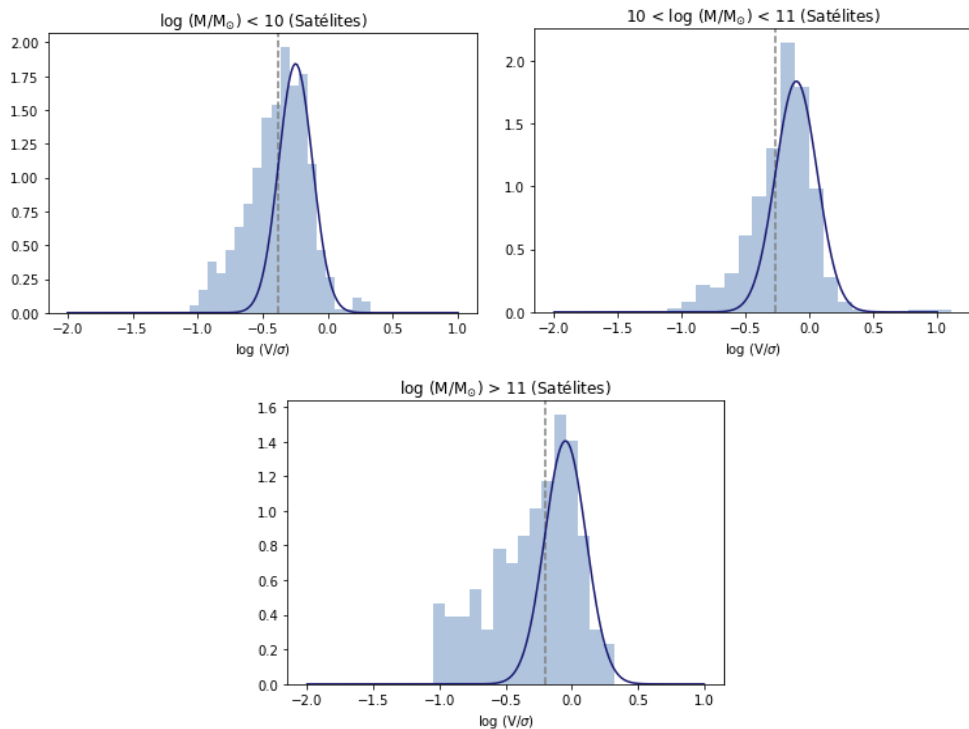
## 2.4 Obtenção de propriedades de populações estelares

Para a obtenção de propriedades de populações estelares, dividimos a galáxia em três regiões delimitadas por círculos concêntricos com raios de  $0.5 R_e$ ,  $1 R_e$  e  $1.5 R_e$  a partir do centro da galáxia, e somamos os espectros dos spaxels contidos em cada um dos anéis. Para cada spaxel, foi calculada a razão sinal-ruído (S/N) do espectro, e aqueles com  $S/N < 5$  foram descartados. Para esse trabalho, utilizamos apenas os espectros resultantes da região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) e da externa ( $1 R_e < R < 1.5 R_e$ ).

Obtivemos médias de idade e metalicidade ponderadas por massa e por luminosidade do espectro resultante de cada região através do algoritmo pPXF, que usa uma combinação linear de modelos espectrais de populações estelares para ajustar o espectro observado. Foi usada uma combinação de 112 modelos de populações estelares de idade e metalicidade únicas de Vazdekis et al. (2010), baseados na biblioteca de espectros estelares empíricos Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra (MILES; Sánchez-Blázquez et al., 2006), e de Delgado et al. (2005), baseados em espectros sintéticos da biblioteca GRANADA (Martins et al., 2005), atualizados com modelos MILES V11 (Vazdekis et al., 2016).



(a) Galáxias centrais.



(b) Galáxias satélites.

Figura 2.2 – Distribuição de  $\log(V/\sigma)$  de galáxias *fast rotators* para diferentes *bins* de massa, usada para separá-las em discos dinamicamente frios e sistemas intermediários. A linha vertical indica o limite entre a população de discos dinamicamente frios (à direita da linha) e sistemas intermediários.

# 3 Resultados

## 3.1 Classes cinemáticas

	<i>Green valley</i>	Sequência principal	Sequência das passivas
<hr/>			
$\log (M/M_{\odot}) < 10$			
<i>Slow rotators</i>	0.10	0.07	0.15
Discos dinamicamente frios	0.51	0.68	0.36
Intermediários	0.38	0.25	0.49
<hr/>			
$10 < \log (M/M_{\odot}) < 11$			
<i>Slow rotators</i>	0.07	0.05	0.14
Discos dinamicamente frios	0.66	0.76	0.26
Intermediários	0.27	0.19	0.60
<hr/>			
$\log (M/M_{\odot}) > 11$			
<i>Slow rotators</i>	0.05	0.05	0.30
Discos dinamicamente frios	0.59	0.71	0.09
Intermediários	0.36	0.24	0.61

Tabela 1 – Frações de classes cinemáticas de galáxias centrais.

	<i>Green valley</i>	Sequência principal	Sequência das passivas
<hr/>			
$\log (M/M_{\odot}) < 10$			
<i>Slow rotators</i>	0.10	0.08	0.21
Discos dinamicamente frios	0.58	0.64	0.32
Intermediários	0.32	0.28	0.47
<hr/>			
$10 < \log (M/M_{\odot}) < 11$			
<i>Slow rotators</i>	0.09	0.06	0.08
Discos dinamicamente frios	0.69	0.77	0.47
Intermediários	0.22	0.17	0.45
<hr/>			
$\log (M/M_{\odot}) > 11$			
<i>Slow rotators</i>	0.07	0.10	0.27
Discos dinamicamente frios	0.51	0.74	0.20
Intermediários	0.42	0.16	0.53

Tabela 2 – Frações de classes cinemáticas de galáxias satélites.

As tabelas 1 e 2 contém as frações de cada classe cinemática no *green valley* e nas sequências principal e das passivas em três *bins* de massa para galáxias centrais e satélites.

Para todos os *bins* de massa, a fração de *slow rotators* é muito pequena tanto no *green valley* quanto na sequência principal, nunca assumindo valores superiores a 0.10. Essa classe cinemática está presente de forma mais significativa na sequência das passivas, com maior fração para galáxias mais massivas (0.30 e 0.27 respectivamente para galáxias centrais e satélites com  $\log (M/M_{\odot}) > 11$ ).

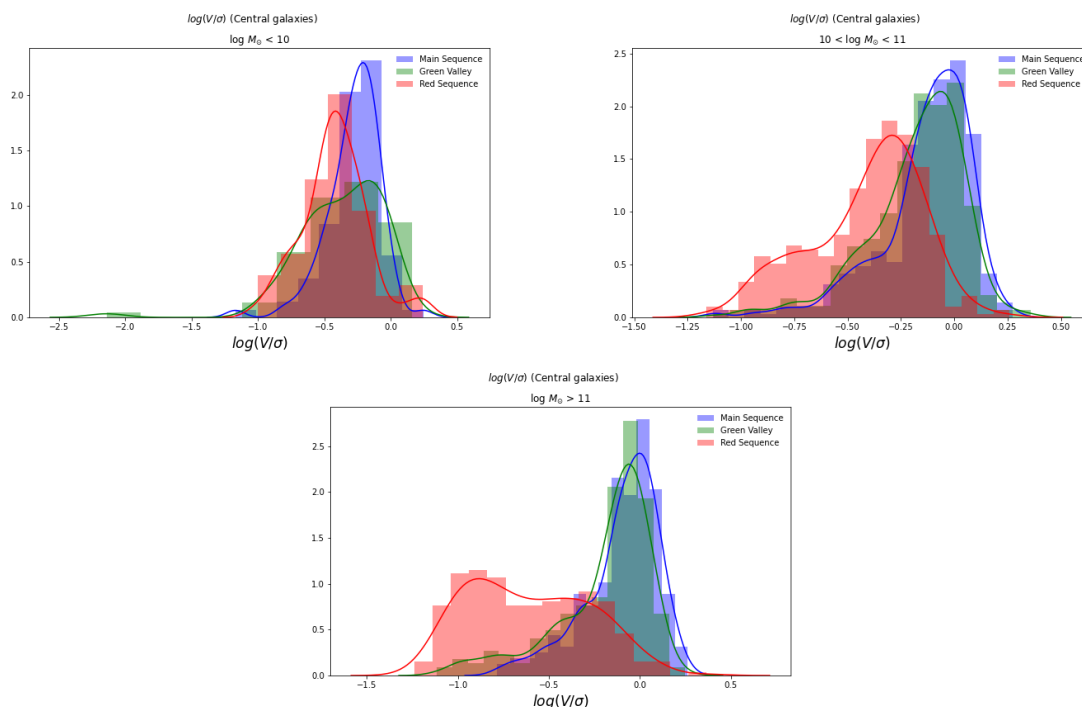


Figura 3.1 – Distribuição de  $V/\sigma$  de galáxias centrais para diferentes *bins* de massa.

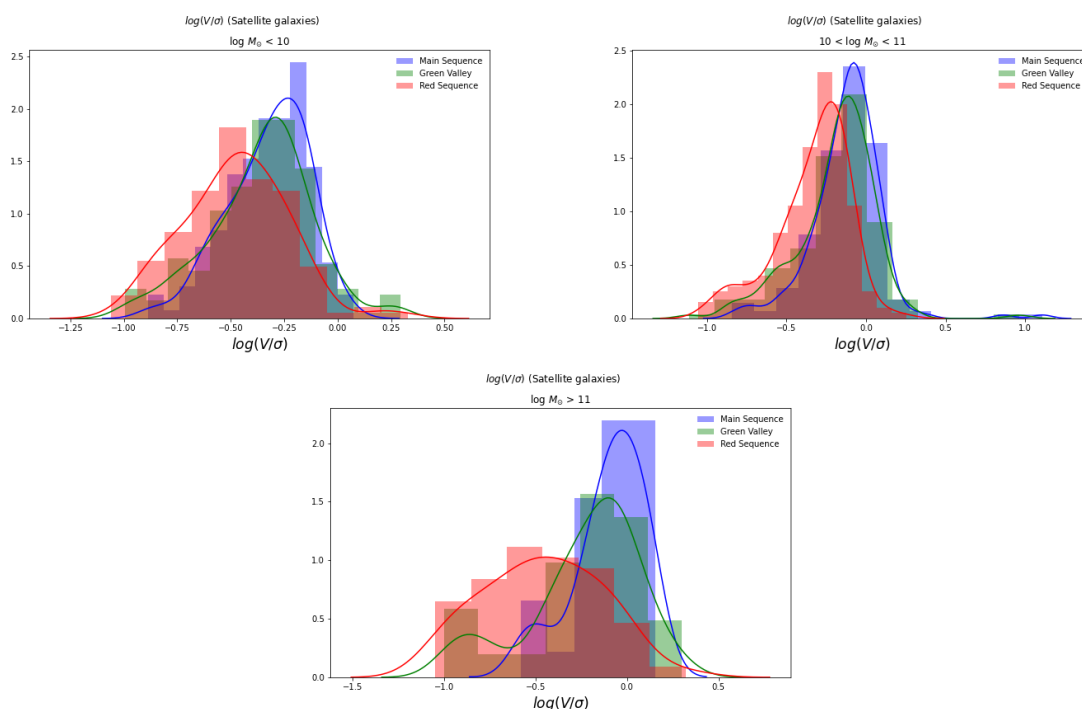


Figura 3.2 – Distribuição de  $V/\sigma$  de galáxias satélites para diferentes *bins* de massa.

Os discos dinamicamente frios são maioria em todos os *bins* de massa tanto para o *green valley* quanto para a sequência principal, e sua prevalência é mais acentuada para galáxias com massa intermediária. Embora não sejam a classe predominante na sequência das passivas, sua presença é considerável, tendo como exceção as galáxias centrais mais massivas, onde sua fração é inferior a 10%.

A presença de sistemas intermediários é significativa para todas as populações, mas é mais prevalente na sequência das passivas. No *green valley*, têm maior contribuição para as galáxias menos e mais massivas.

Observa-se que, embora a prevalência das diferentes classes cinemáticas no *green valley* sejam semelhantes à da sequência principal, ainda é possível notar que o *green valley* apresenta valores intermediários entre as sequências principal e das passivas no que diz respeito às frações de discos dinamicamente frios e sistemas intermediários. Esse resultado está refletido nas figuras 3.1 e 3.2, que mostra a distribuição de  $\log(V/\sigma)$  para galáxias centrais e satélites, respectivamente. Constata-se que o pico das distribuições para galáxias do *green valley* se encontra entre aqueles das sequências principal e das passivas.

A figura 3.3 mostra imagens ópticas de galáxias representativas de cada classe cinemática. Por inspeção visual, nota-se que os discos dinamicamente frios e sistemas intermediários do *green valley* se assemelham mais aos da sequência principal, que em sua maioria apresentam braços espirais, do que aos da sequência das passivas, que são principalmente discos sem estruturas espirais. No apêndice A encontram-se mais exemplos de cada classe cinemática para os demais *bins* de massa.

## 3.2 Propriedades de populações estelares

Foram realizados testes de Kolmogorov-Smirnov (KS) comparando as distribuições de propriedades de formação estelar das galáxias do *green valley* com as das sequências principal e das passivas, e constatou-se que há diferença estatisticamente significativa na idade ponderada por luminosidade entre as diferentes populações, para todos os *bins* de massa, tanto para as galáxias centrais quanto para as satélites, na região mais interna e na mais externa das galáxias. As galáxias do *green valley* apresentam idades intermediárias às das sequências principal e das passivas (figuras 3.4-3.15).

Nas região interna das galáxias centrais (figuras 3.4-3.6) foram encontradas diferenças estatisticamente significativas na idade ponderada por massa entre as galáxias de massa intermediária e as mais massivas do *green valley* e da sequência das passivas; na metalicidade ponderada por luminosidade entre galáxias do *green valley* e da sequência das passivas para todos os *bins* de massa e na metalicidade ponderada por massa para todas as populações com exceção às galáxias do *green valley* e da sequência principal de baixa massa.

Na região externa das centrais (figuras 3.7-3.9) os resultados são parecidos, mas não foi encontrada diferença significativa na metalicidade ponderada por luz entre galáxias do *green valley* e da sequência das passivas de massa intermediária, e apenas há diferença na metalicidade ponderada por massa as galáxias menos massivas e as de massa intermediária do *green valley* e da sequência das passivas.

Observa-se que, para as galáxias centrais, as relações entre as diferentes populações é a mesma para as idades e muda apenas para as metalicidades entre as regiões interna e

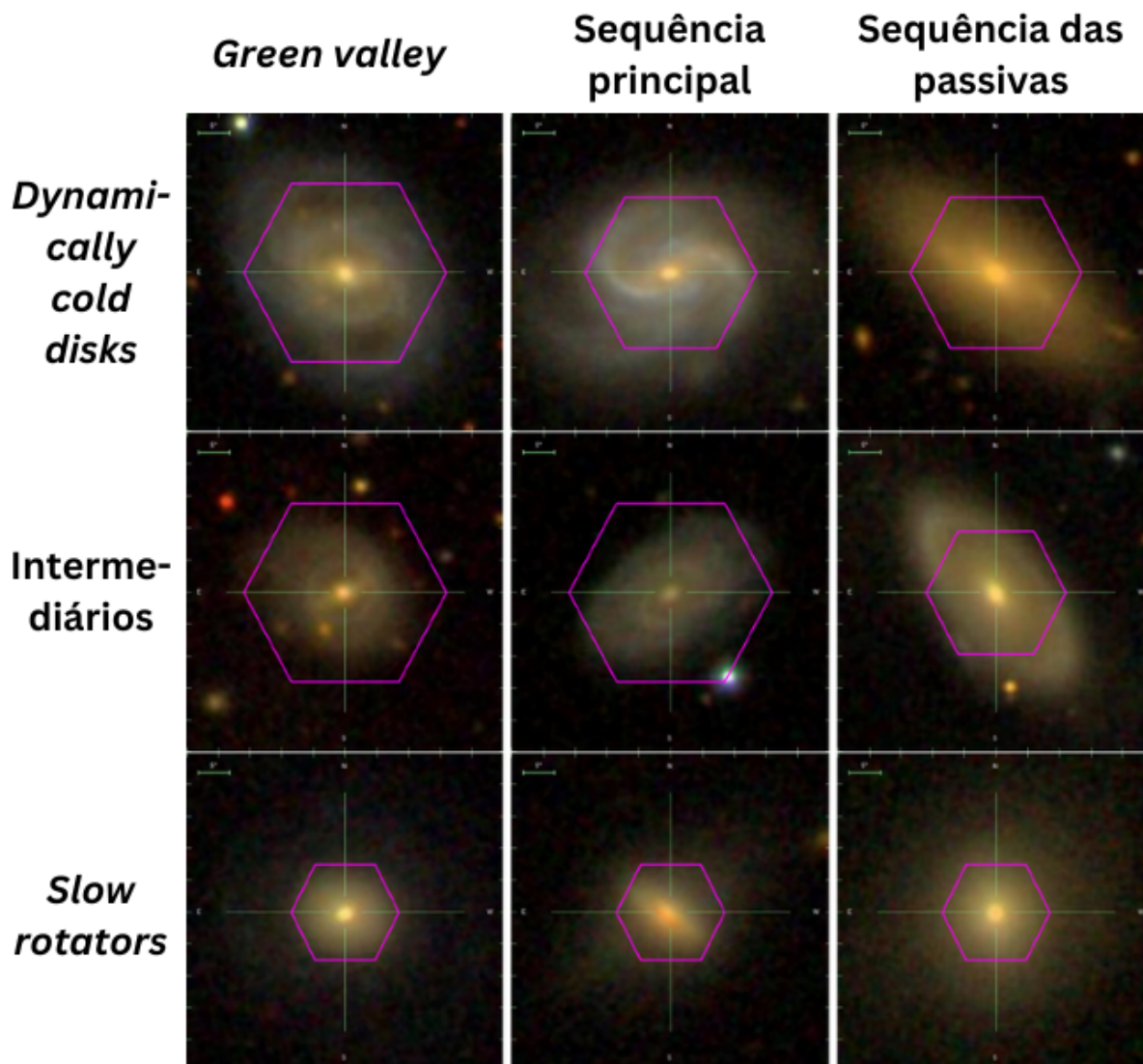


Figura 3.3 – Exemplos de imagens do SDSS de galáxias centrais com  $\log_{10} < (M/M_{\odot}) < 11$  de cada classe cinemática.

externa.

Na região interna das satélites (figuras 3.10-3.12), há diferença estatisticamente significativa na idade ponderada por massa pra todas as populações, com exceção às galáxias menos massivas do *green valley* e da sequência principal; na metalicidade ponderada por luminosidade entre as galáxias menos massivas do *green valley* e da sequência principal e entre as de massa intermediária do *green valley* e da sequência das passivas; e na metalicidade ponderada por massa de todas as galáxias menos massivas e de massa intermediária.

Na região externa das satélites (figuras 3.13-3.15), há diferença estatisticamente significativa na idade ponderada por massa entre as galáxias menos massivas e as de massa intermediária do *green valley* e da sequência das passivas, e entre as mais massivas do *green valley* da sequência principal; na metalicidade ponderada por luminosidade entre as menos massivas do *green valley* e da sequência principal; e na metalicidade ponderada por

massa entre as menos massivas e as de massa intermediária do *green valley* e da sequência principal, e entre as de massa intermediária do *green valley* e da sequência das passivas.

De forma geral, há mais diferença entre as regiões interna e externa das galáxias satélites do que das centrais.

A distribuição das propriedades de populações estelares das galáxias centrais e satélites do *green valley* (figuras 3.16-3.21) apresentam diferenças mínimas para todos os *bins* de massa, tanto para a região interna quanto para a externa, como constatado a partir do teste KS.

Comparando as propriedades das regiões externa e interna de galáxias do *green valley* (figuras 3.22-3.27), constata-se que há diferença estatisticamente significativa para galáxias mais massivas e de massa intermediária, com exceção à idade ponderada por massa para galáxias satélite de massa intermediária. Para galáxias de baixa massa, não foram encontradas diferenças entre as regiões para nenhuma das propriedades.

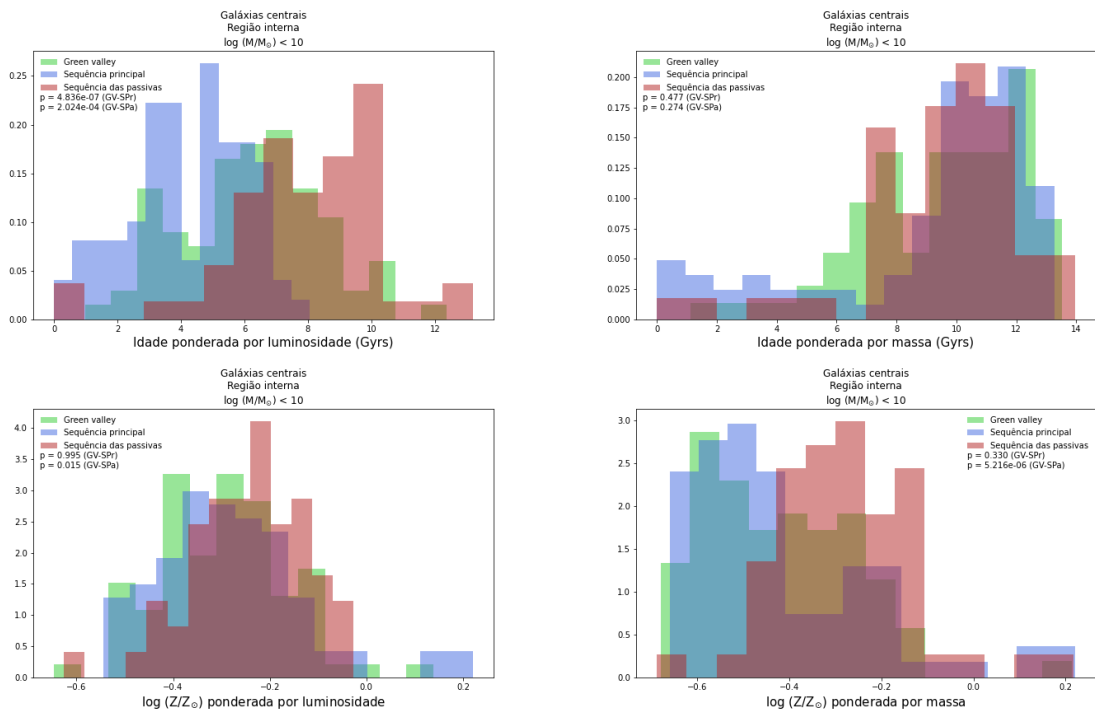


Figura 3.4 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais com  $\log (M/M_{\odot}) < 10$ .

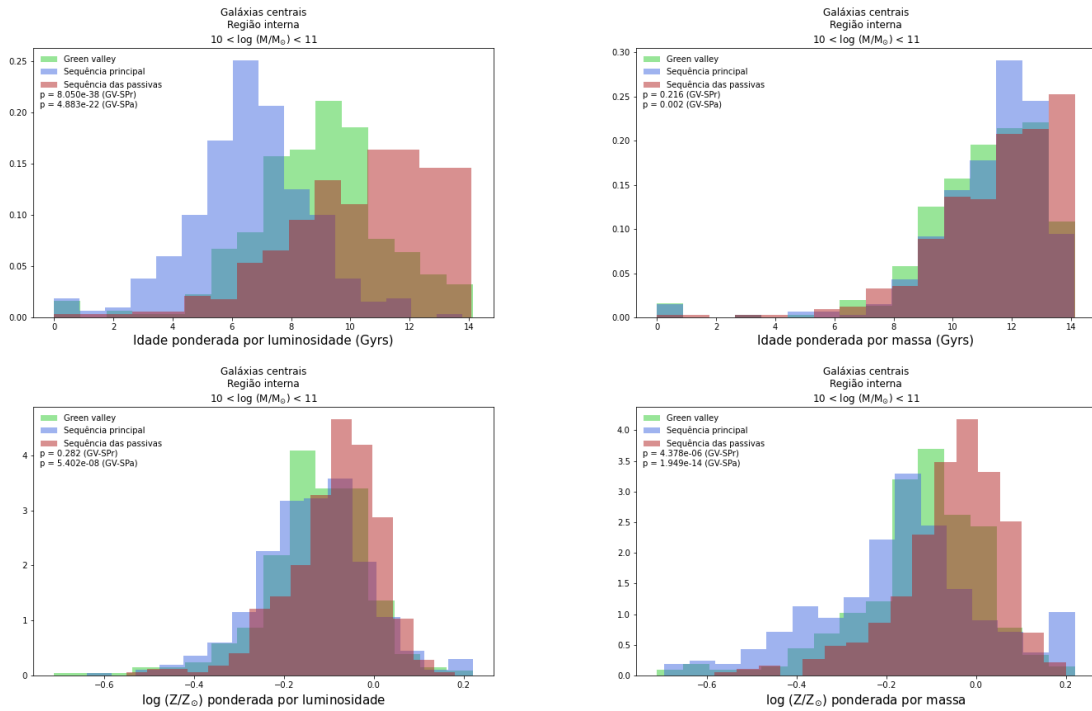


Figura 3.5 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais com  $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ .

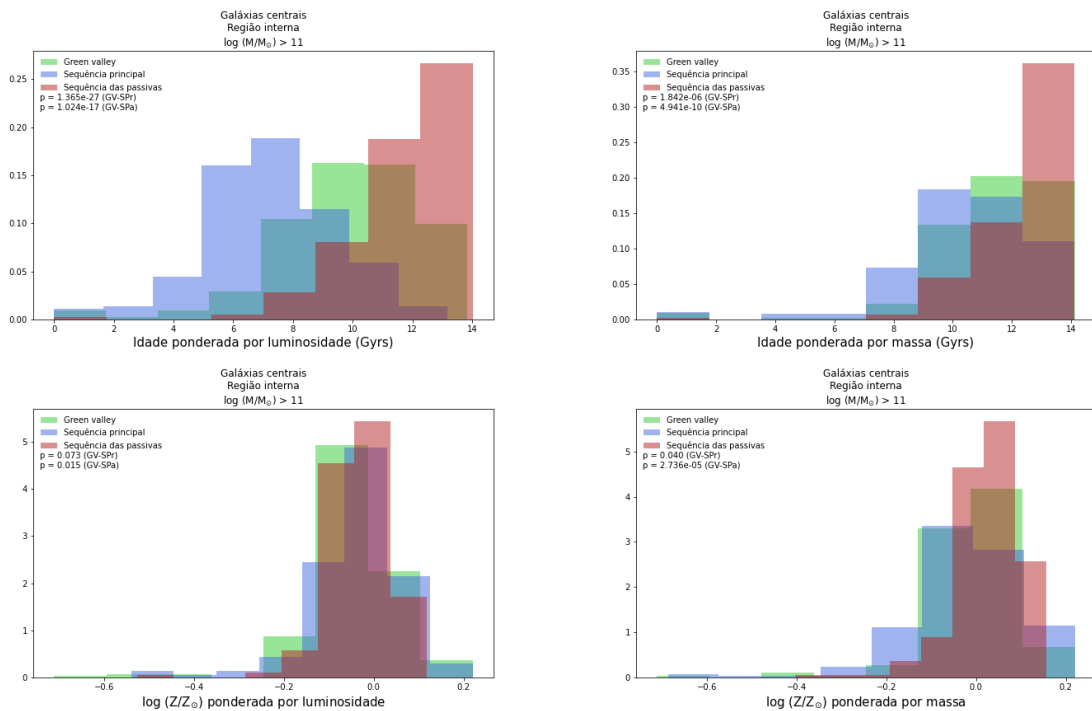


Figura 3.6 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais com  $\log(M/M_{\odot}) > 11$ .



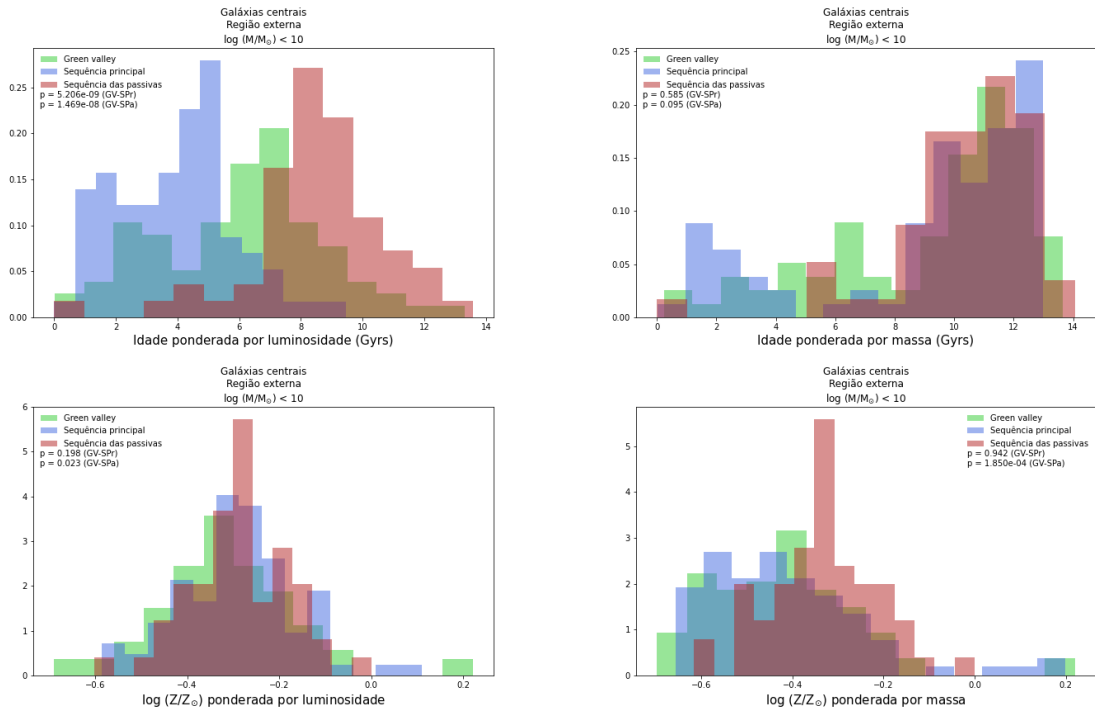


Figura 3.7 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais com  $\log(M/M_{\odot}) < 10$ .

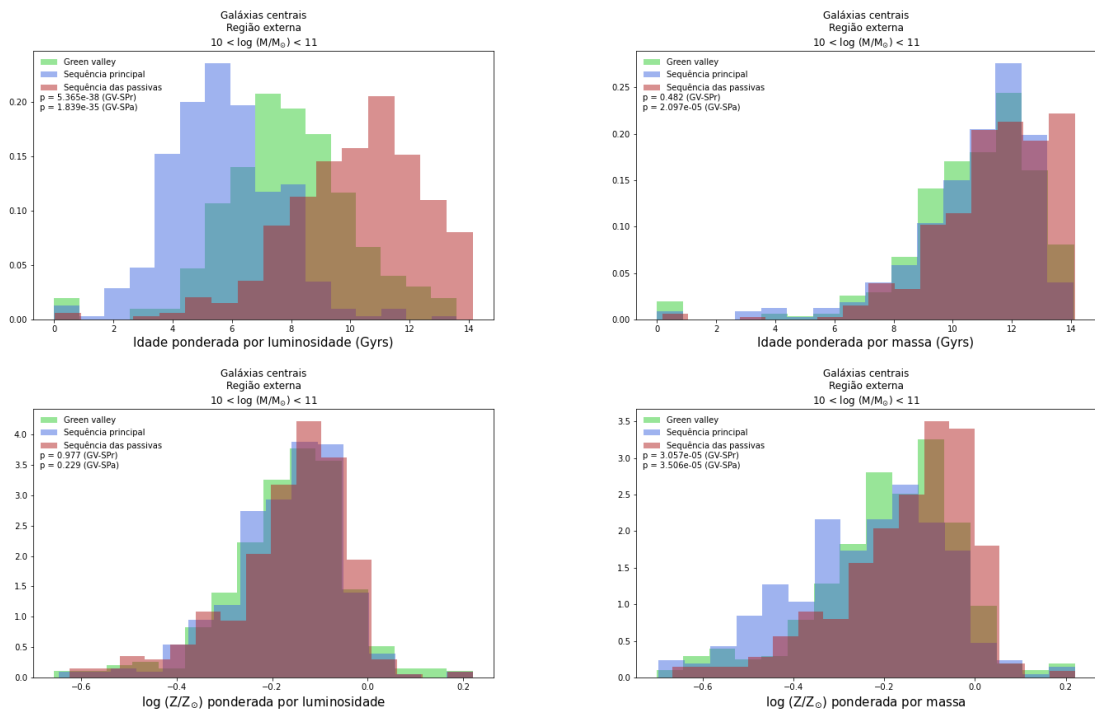


Figura 3.8 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais com  $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ .

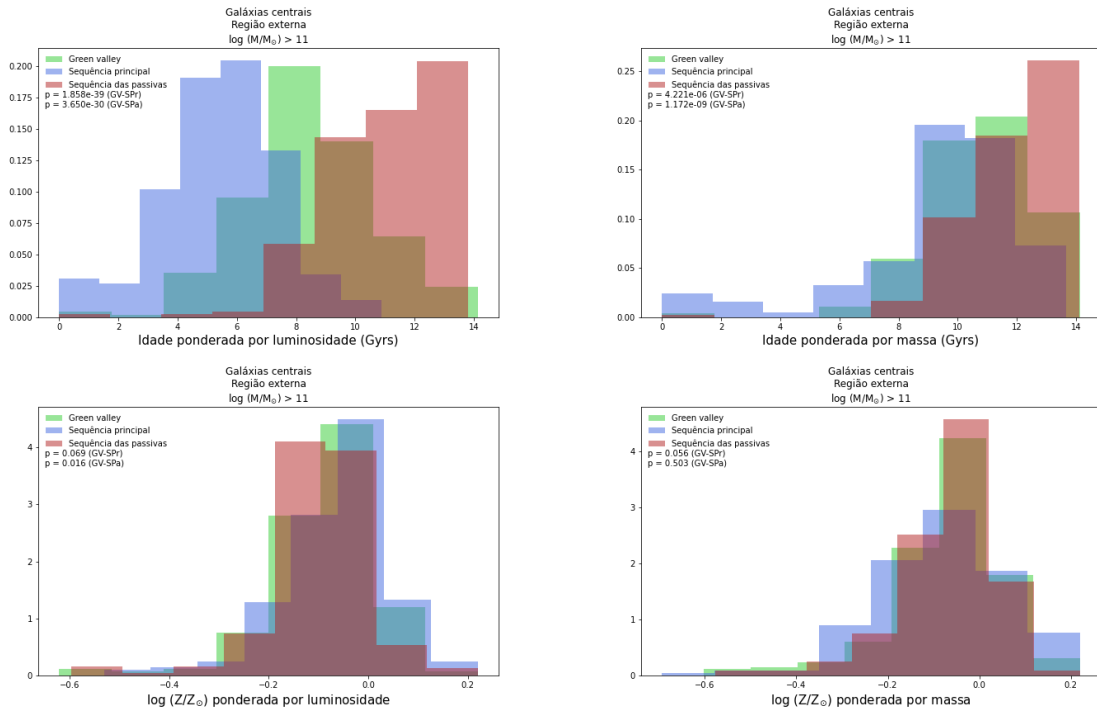


Figura 3.9 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais com  $\log(M/M_{\odot}) > 11$ .

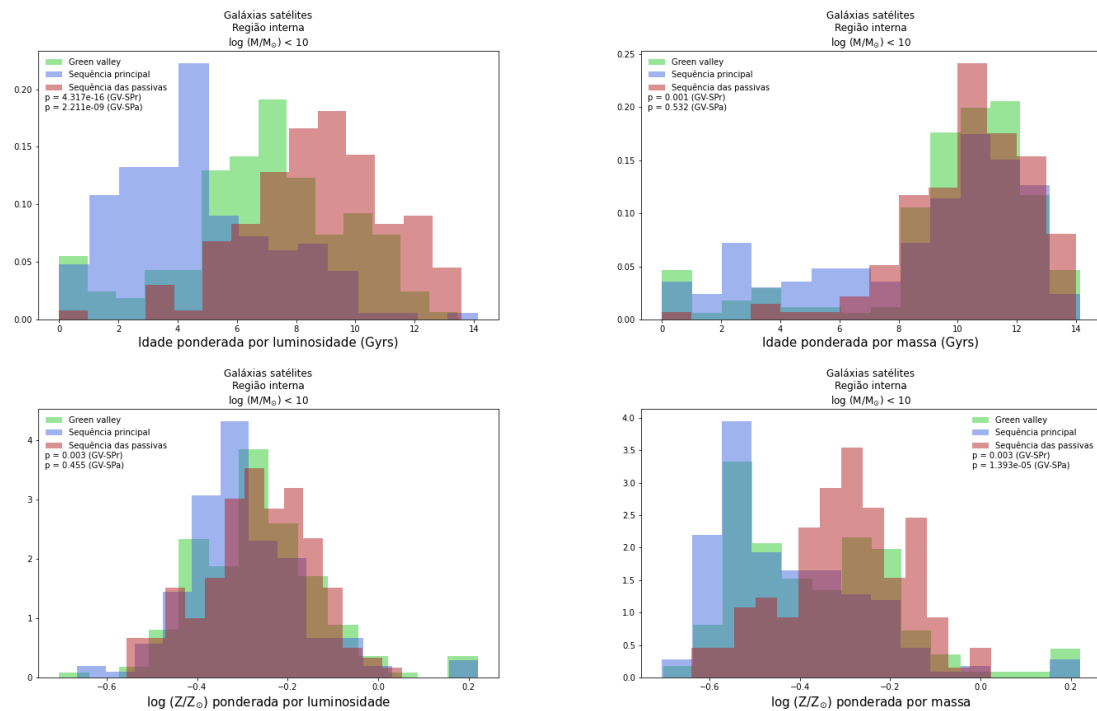


Figura 3.10 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias satélites com  $\log(M/M_{\odot}) < 10$ .

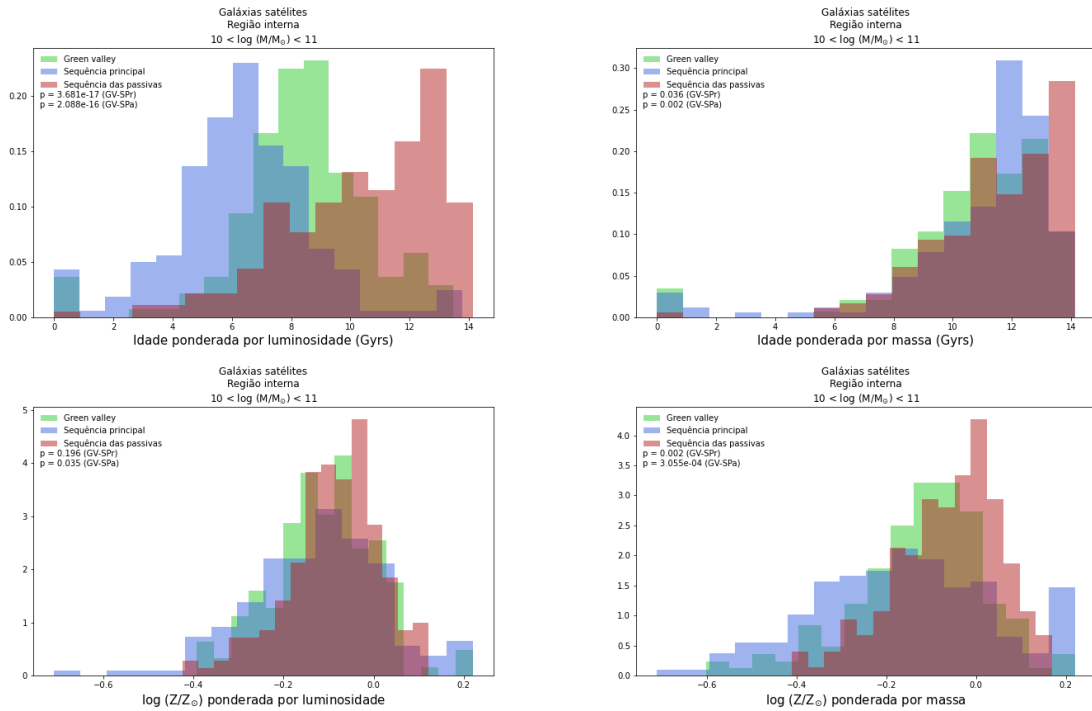


Figura 3.11 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias satélites com  $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ .

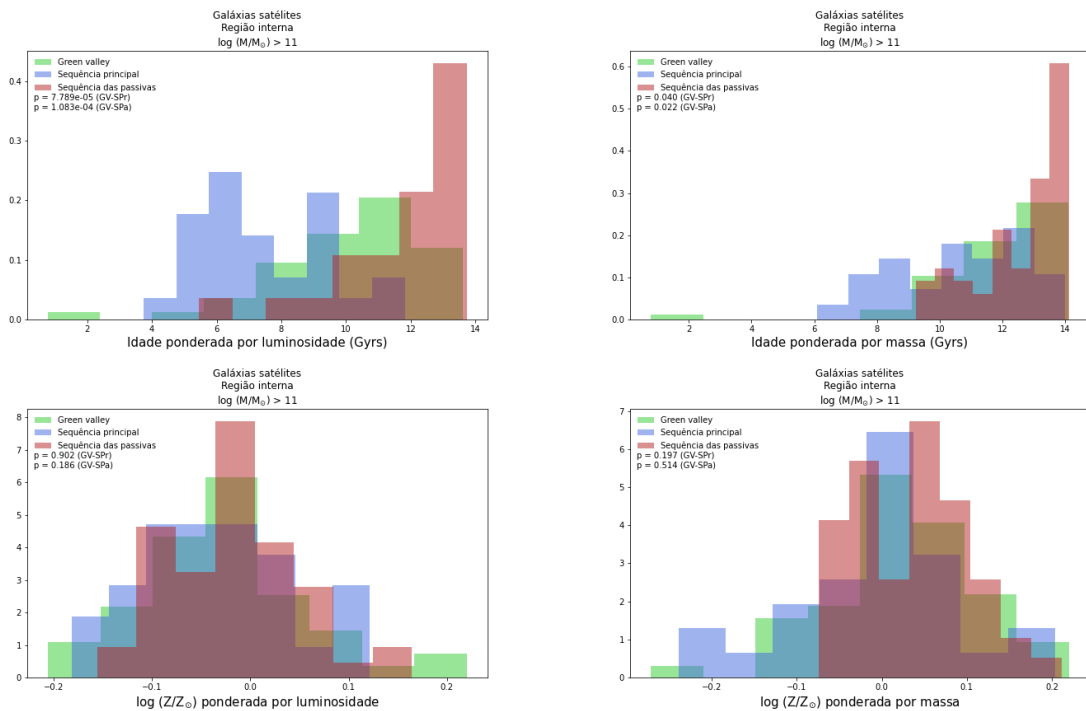


Figura 3.12 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias satélites com  $\log(M/M_{\odot}) > 11$ .

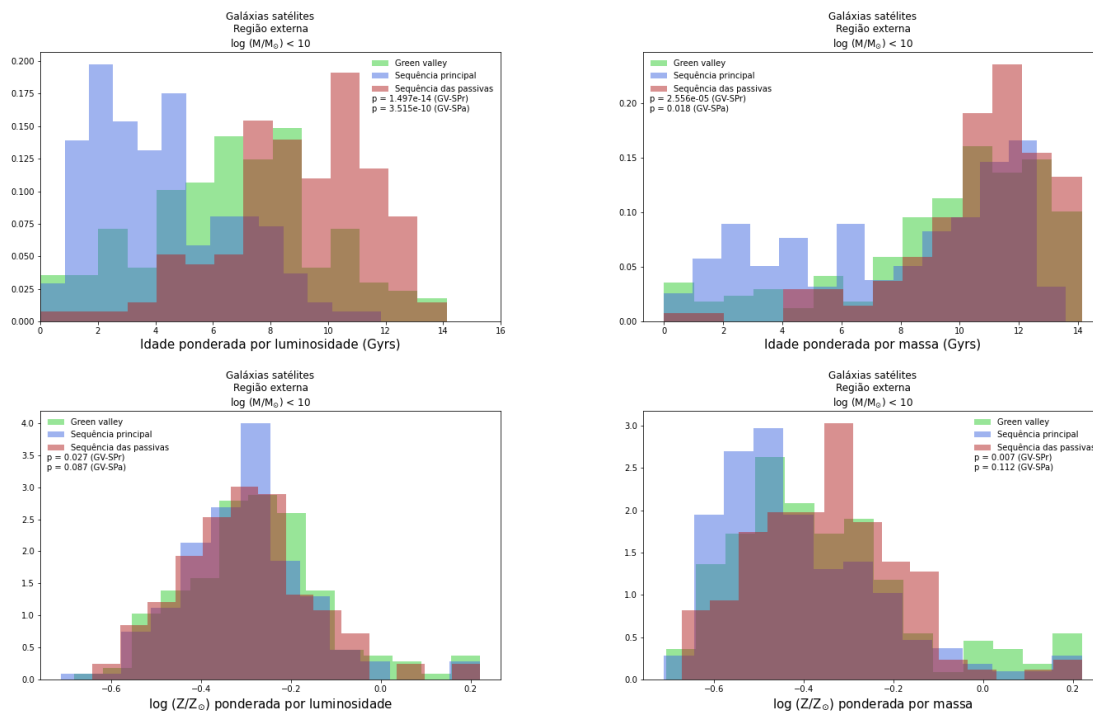


Figura 3.13 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias satélites com  $\log(M/M_{\odot}) < 10$ .

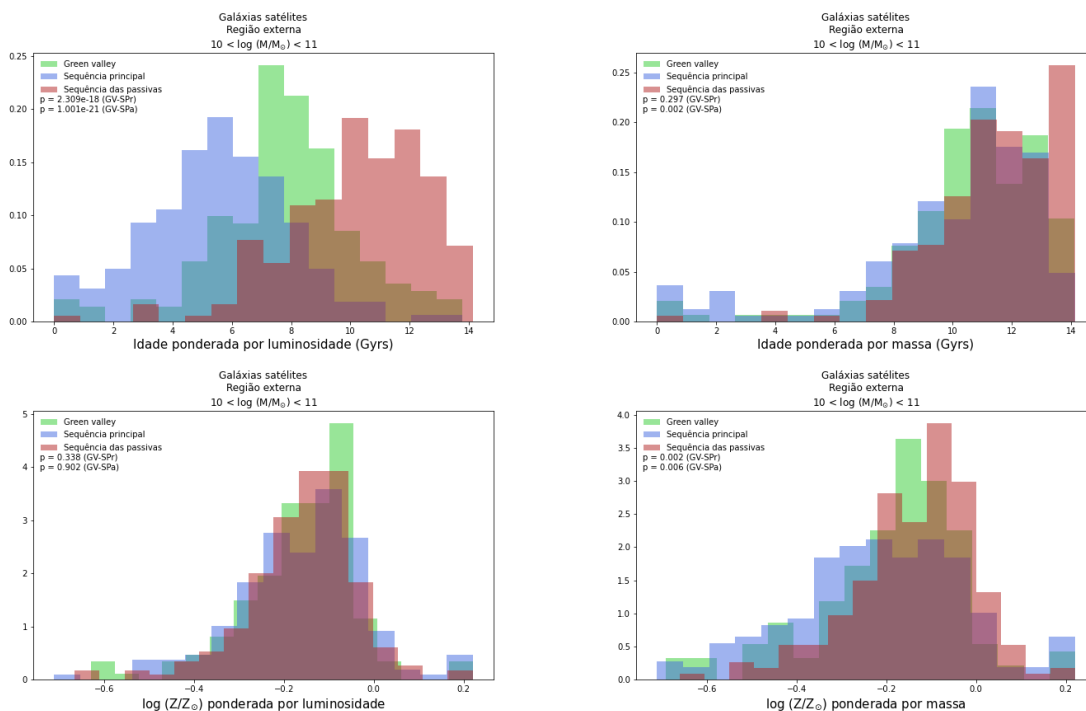


Figura 3.14 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias satélites com  $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ .

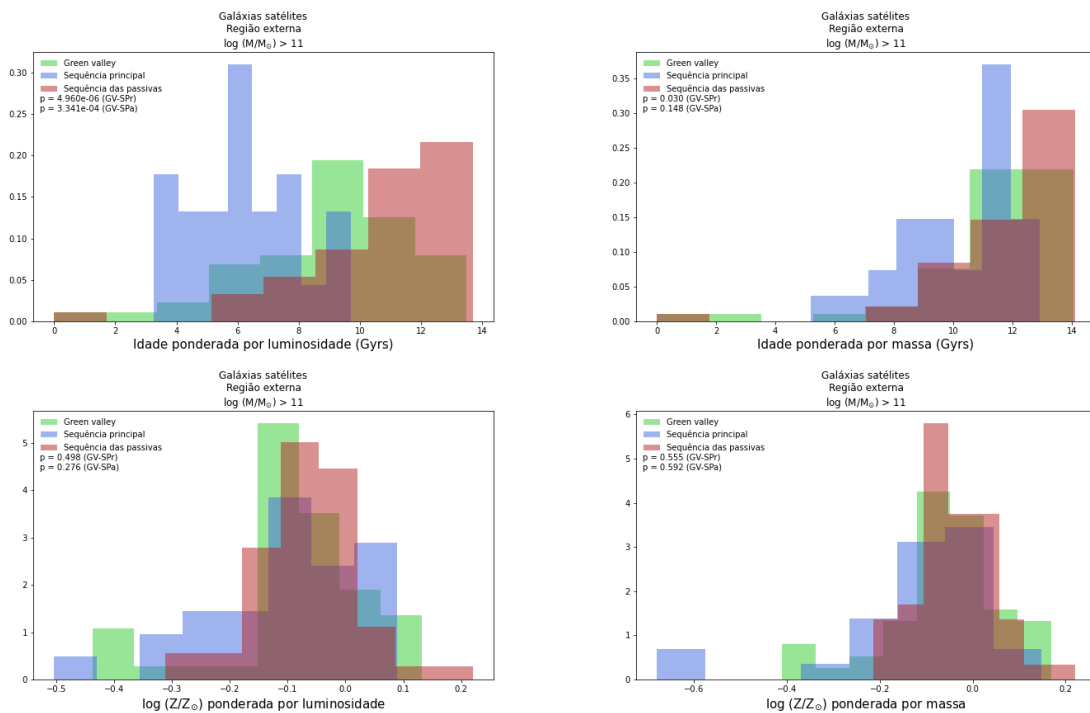


Figura 3.15 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias satélites com  $\log(M/M_{\odot}) > 11$ .

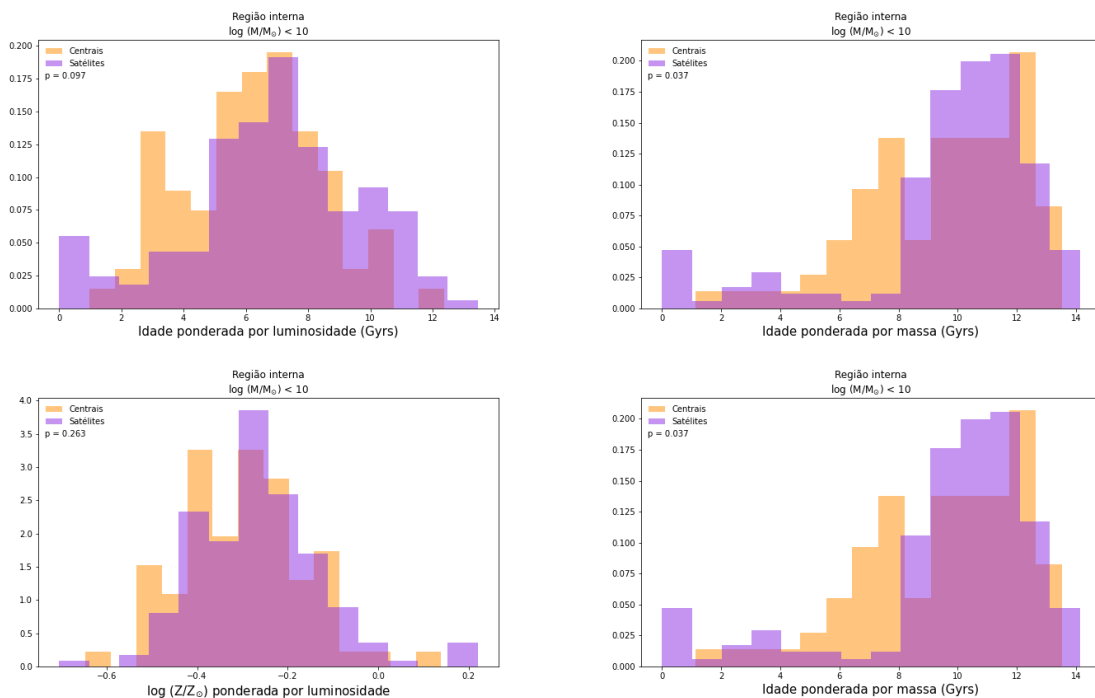


Figura 3.16 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do *green valley* com massa  $\log(M/M_{\odot}) < 10$ .

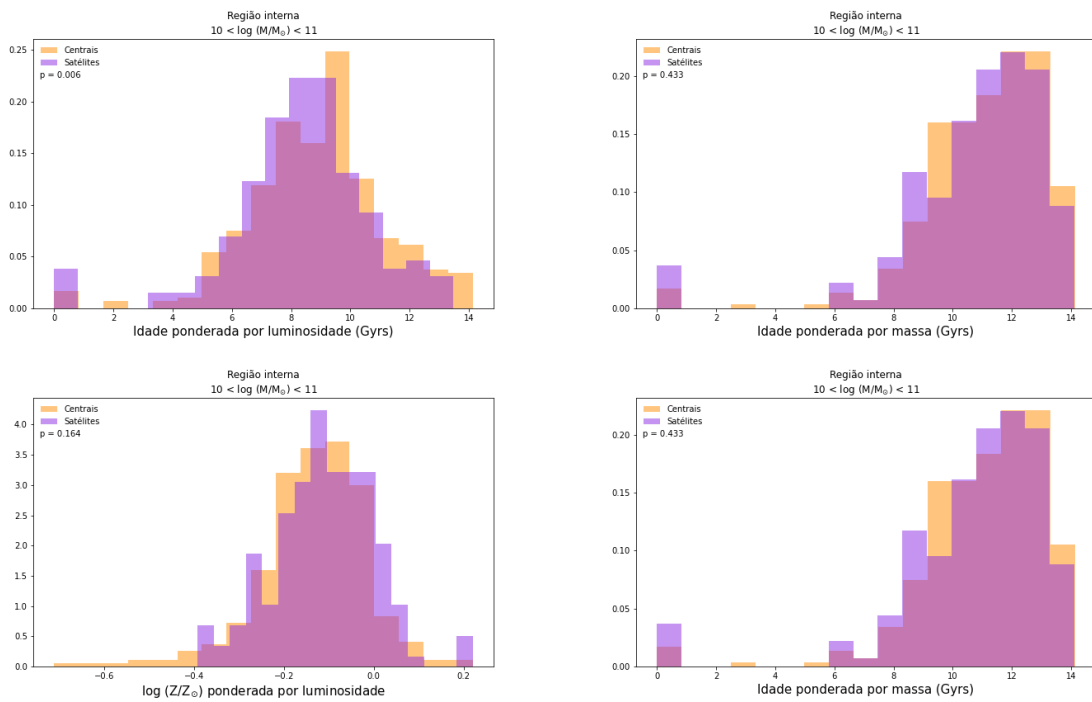


Figura 3.17 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do *green valley* com massa  $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ .

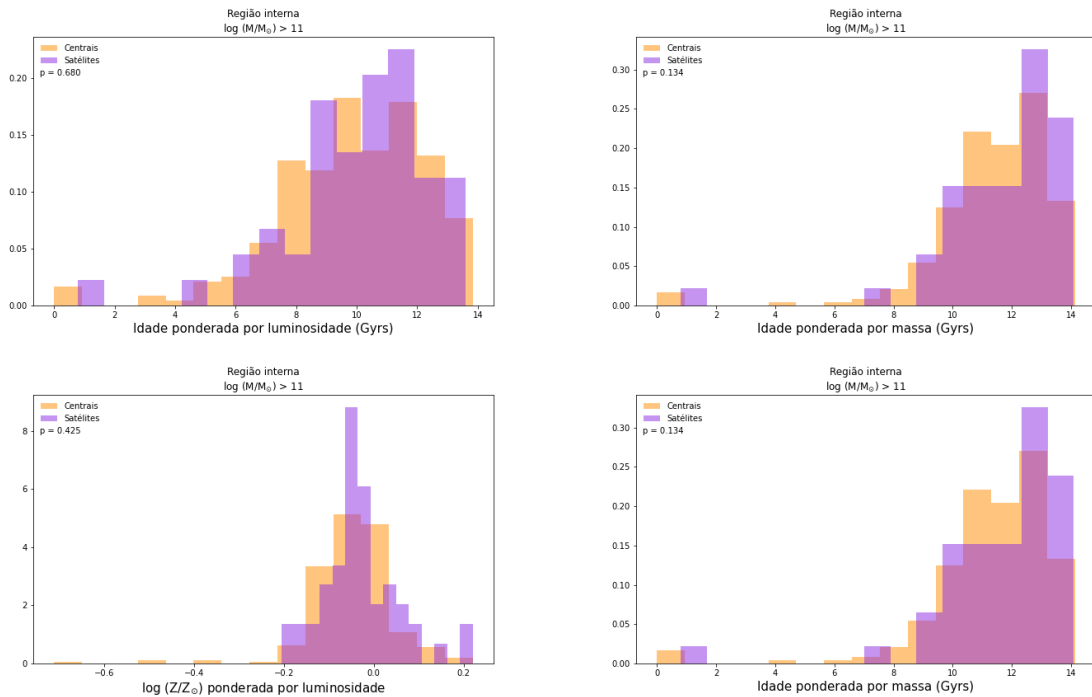


Figura 3.18 – Propriedades de populações estelares na região interna ( $R < 0.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do *green valley* com massa  $\log(M/M_{\odot}) > 11$ .

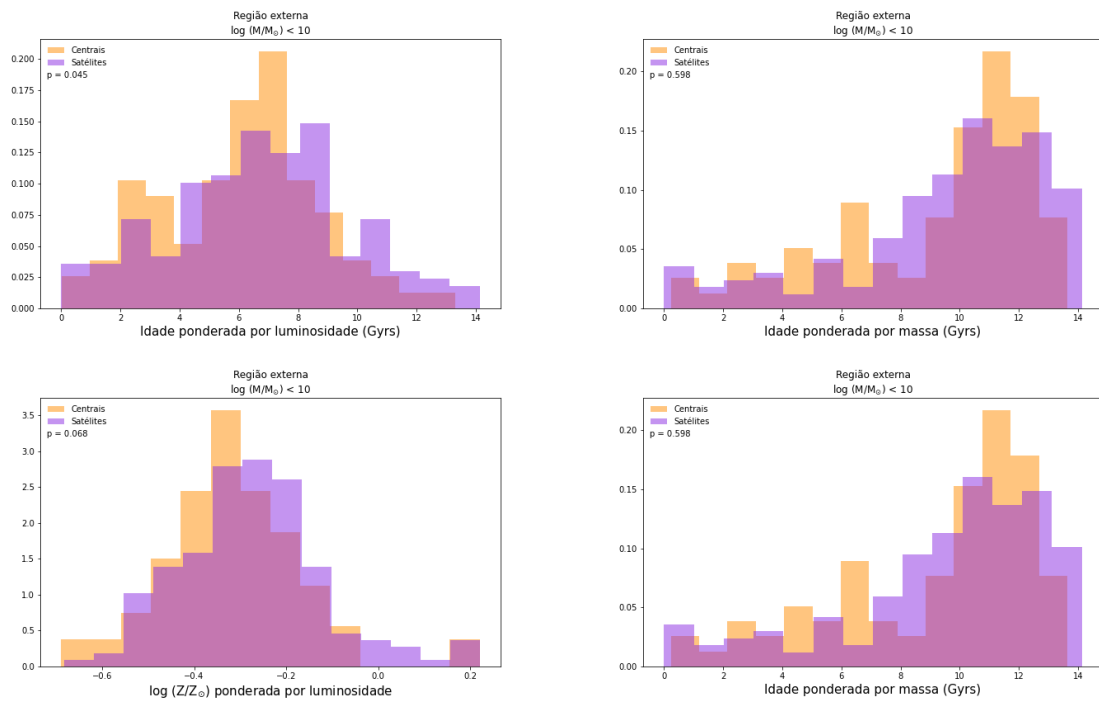


Figura 3.19 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do *green valley* com massa  $\log (M/M_\odot) < 10$ .

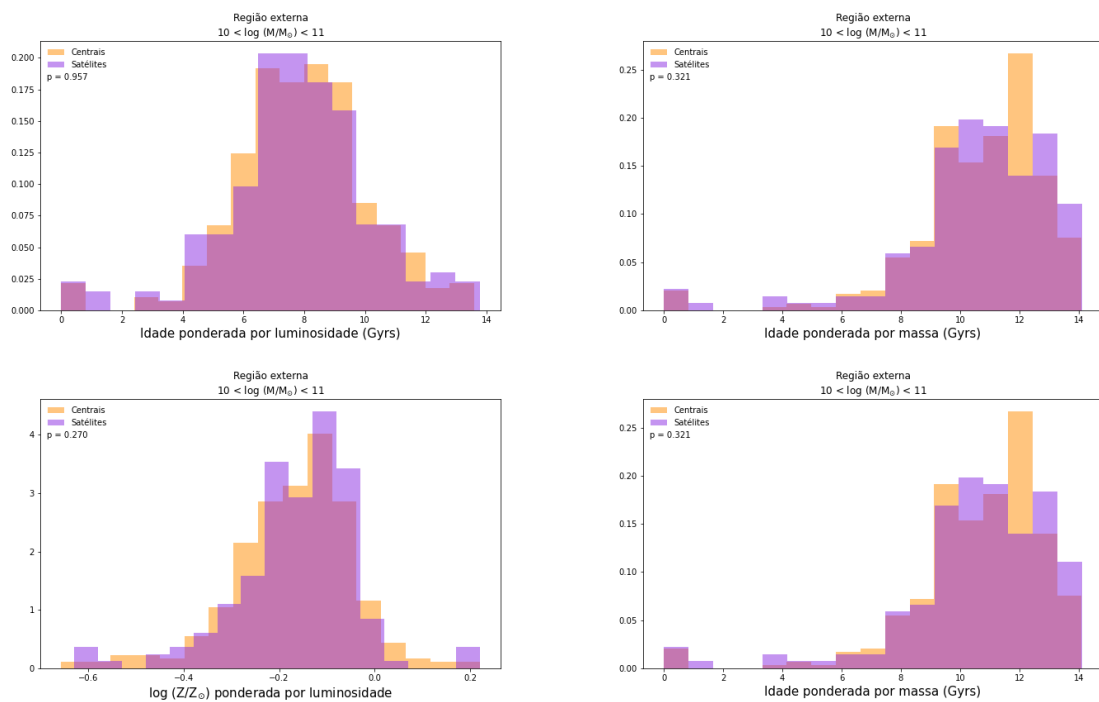


Figura 3.20 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do *green valley* com massa  $10 < \log (M/M_\odot) < 11$ .

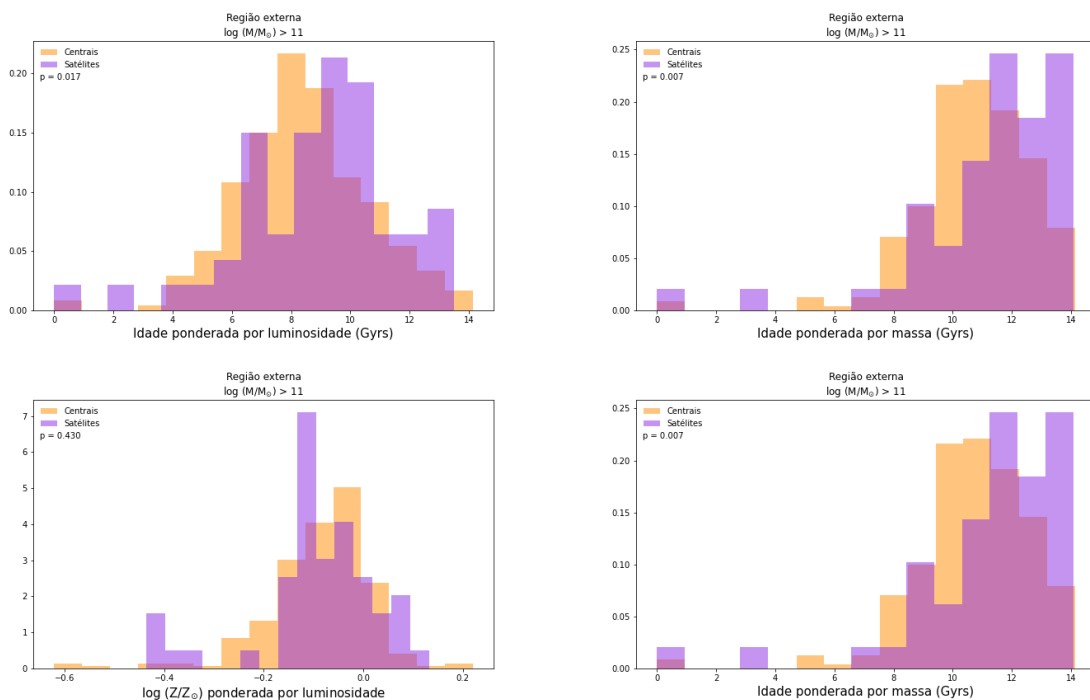


Figura 3.21 – Propriedades de populações estelares na região externa ( $1R_e < R < 1.5 R_e$ ) de galáxias centrais e satélites do *green valley* com massa  $\log(M/M_\odot) > 11$ .

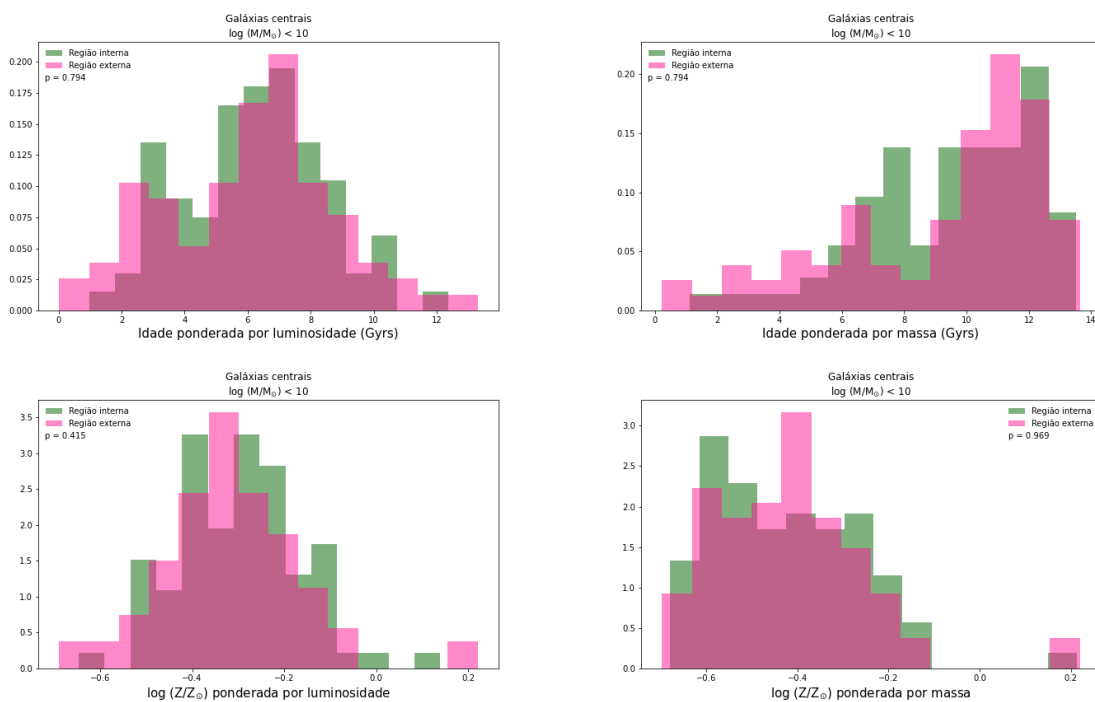


Figura 3.22 – Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias centrais do *green valley* com  $\log(M/M_\odot) < 10$ .



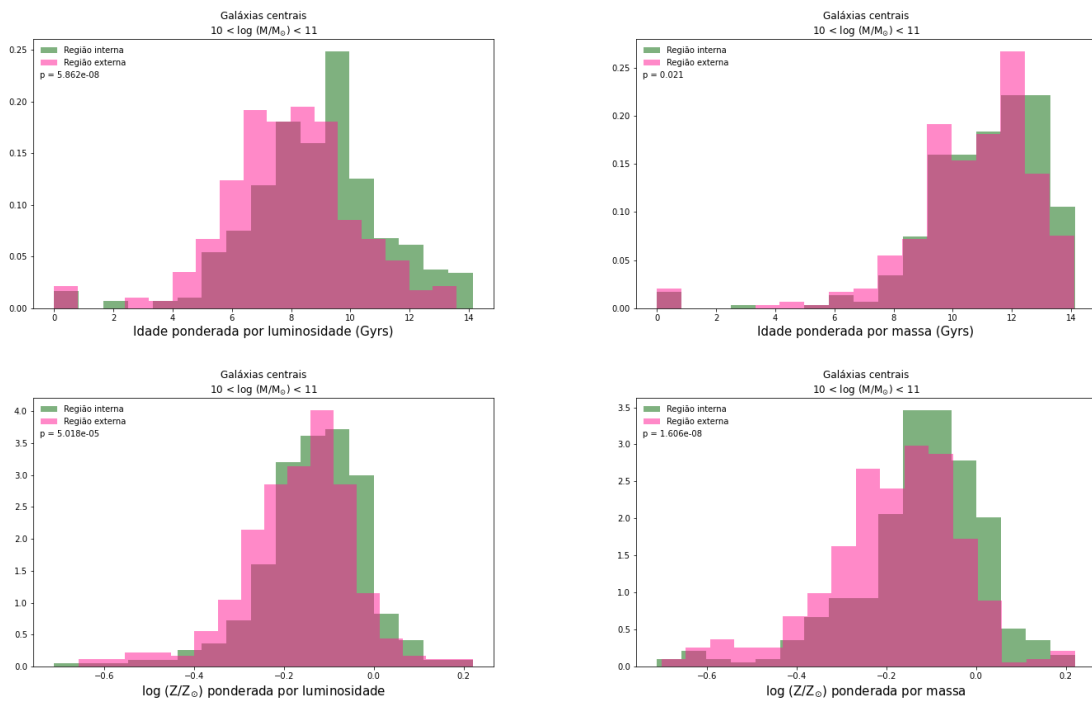


Figura 3.23 – Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias centrais do *green valley* com  $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ .

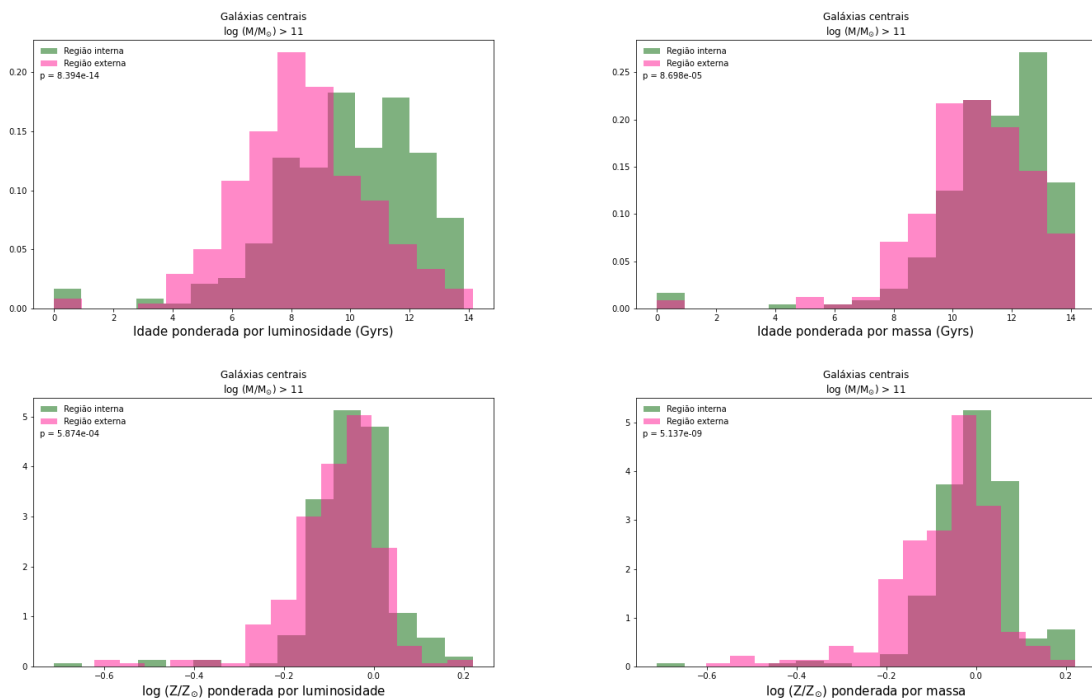


Figura 3.24 – Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias centrais do *green valley* com  $\log(M/M_{\odot}) > 11$ .

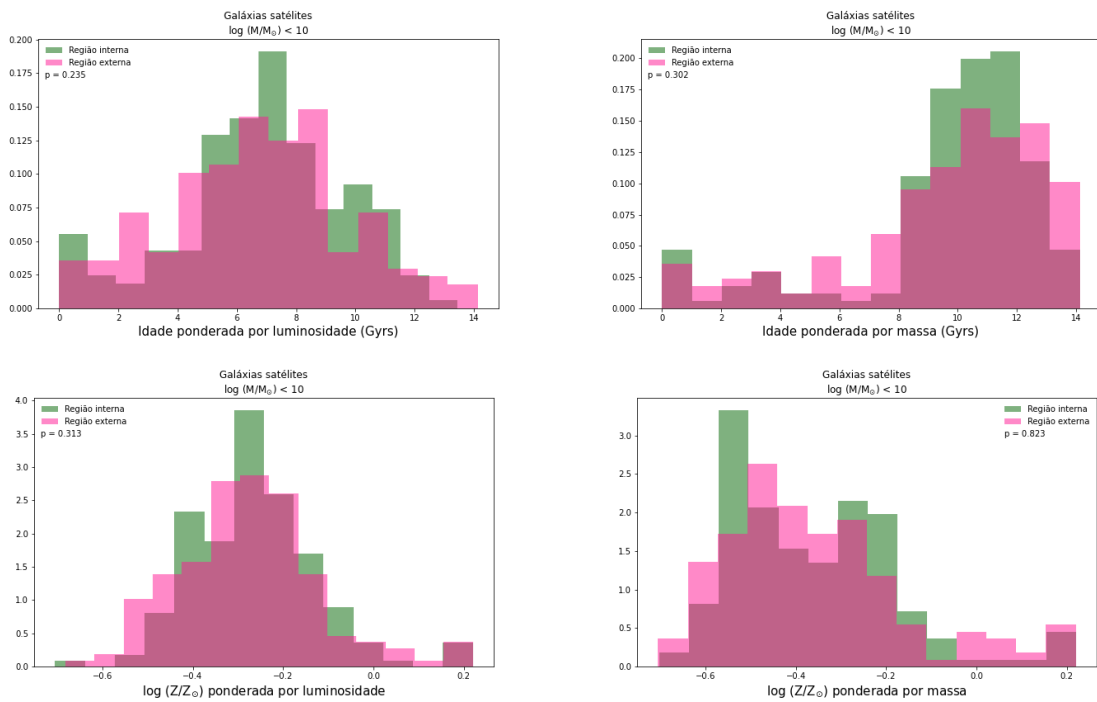


Figura 3.25 – Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias satélites do *green valley* com  $\log(M/M_{\odot}) < 10$ .

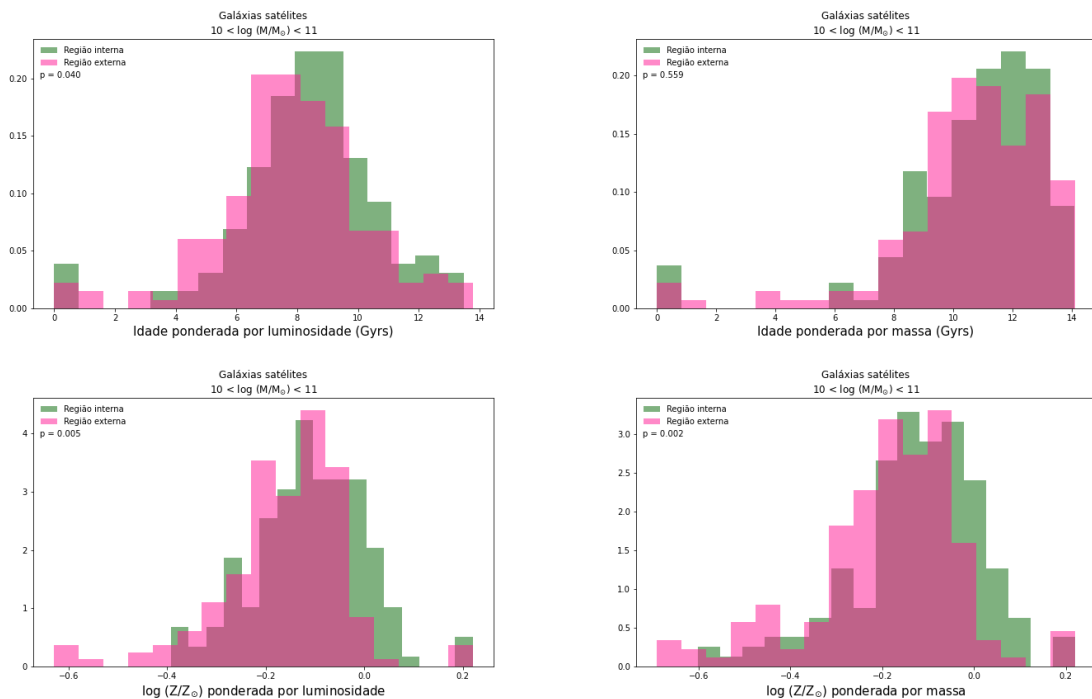


Figura 3.26 – Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias satélites do *green valley* com  $10 < \log(M/M_{\odot}) < 11$ .

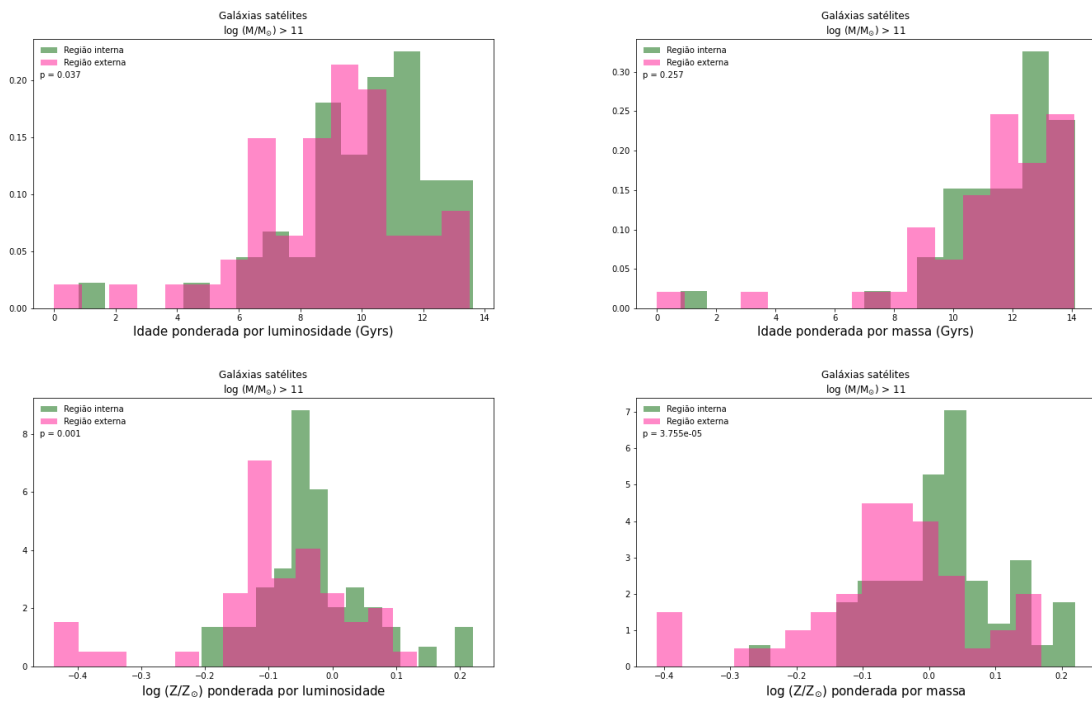


Figura 3.27 – Distribuição de propriedades de populações estelares nas regiões interna e externa de galáxias satélites do *green valley* com  $\log(M/M_{\odot}) > 11$ .

## 4 Discussão

Estudos apontam para o *green valley* como uma população com propriedades intermediárias, não só em taxa de formação estelar e cor, como também em morfologia e ambiente. Nesse estudo, encontramos evidências de que o *green valley* também é intermediário em relação às sequências principal e das passivas em propriedades cinemáticas, como mostram as distribuições das frações de cada classe cinemática presentes nas tabelas 1 e 2 e as figuras 3.1 e 3.2.

As frações maiores de sistemas intermediários no *green valley* em relação à sequência principal indicam que, se de fato galáxias transicionam da sequência principal para a sequência das passivas através do *green valley*, processos que diminuem o grau de suporte rotacional de um sistema devem ocorrer durante a passagem pelo *green valley*. Assumindo que a transição da sequência principal para o *green valley* não seleciona um tipo específico de galáxia, um certo número de discos dinamicamente frios devem sofrer processos que os transformam em sistemas intermediários. Para explicar a maior porcentagem de *slow rotators* na sequência das passivas em relação à sequência principal dentro desse cenário, é necessário que algumas galáxias se transformem em *slow rotators* na transição do *green valley* para a sequência das passivas. Estudos relacionam a formação de *slow rotators* a fusões de galáxias (Krajnović et al., 2020), e particularmente *slow rotators* de mais alta massa são formados a partir da fusão de galáxias massivas em alto *redshift* (Cappellari, 2016).

A presença significativa de discos dinamicamente frios passivos indica que devem haver processos que diminuam a formação estelar sem afetar a cinemática. Cortese et al. (2021) aponta para *cold gas stripping* como um processo que diminui a taxa de formação estelar preservando a morfologia discoidal, e Fraser-McKelvie et al. (2018) relaciona discos passivos a processos seculares associados à presença de barras.

Em relação às propriedades de populações estelares, a diferença encontrada na idade ponderada por luminosidade, quantidade mais sensível à estrelas mais jovens, entre galáxias do *green valley* e das sequências principal e das passivas, com o *green valley* apresentando valores intermediários, era esperada, pois galáxias do *green valley* ainda não cessaram completamente sua formação estelar como as galáxias passivas, mas formam menos estrelas que as da sequência principal.

As mínimas diferenças encontradas entre galáxias centrais e satélites do *green valley* indicam que efeitos ambientais não são de grande relevância para os processos que levam as galáxias ao *green valley*.

As diferenças em idade e metalicidade entre as regiões interna, cuja luminosidade é dominada pelo bojo, e externa, associada ao disco, das galáxias do *green valley* massivas e de massa intermediária sugerem, para essas galáxias, bojo e disco têm históricos de

formação estelar distintos.

## 5 Conclusão

Utilizamos dados de espectroscopia de campo integral para obter parâmetros cinemáticos estelares de galáxias do *green valley* e das sequências principal e das passivas para separá-las em três classes cinemáticas de acordo com o grau de suporte rotacional: *slow rotators*, discos dinamicamente frios e sistemas intermediários. Comparamos as frações de cada classe nas diferentes populações a fim de investigar a relação entre cinemática e a taxa de formação estelar intermediária de galáxias do *green valley*, e de impor vínculos aos processos que levam galáxias a transicionar da sequência principal à sequência das passivas.

Encontramos evidências de que o *green valley* também é intermediário em relação às sequências principal e das passivas em propriedades cinemáticas. Se as galáxias de fato transicionam da sequência principal para a das passivas através do *green valley*, processos que diminuem o grau de suporte rotacional devem ocorrer para explicar a maior fração de sistemas intermediários no *green valley* em relação à sequência principal, e o maior número de *slow rotators* na sequência das passivas.

Também obtivemos propriedades de populações estelares das regiões internas e externas das galáxias de nossa amostra. Encontramos valores intermediários de idade ponderada por luminosidade para o *green valley*, o que é condizente com o fato de que a formação estelar no *green valley* é menos intensa do que na sequência principal, mas ainda não cessou completamente.

Comparamos as propriedades de populações estelares de galáxias centrais e satélites do *green valley* e encontramos poucas diferenças, o que indica que efeitos ambientais não são responsáveis por levar galáxias ao *green valley*.

As diferenças encontradas nas propriedades das regiões interna e externa de galáxias do *green valley* massivas e de massa intermediária sugerem que, nestas galáxias, disco e bojo têm históricos de formação estelar distintos.

# Referências

- Blanton, M. R. e Moustakas, J. (2009). Physical properties and environments of nearby galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 47:159–210.
- Bundy, K., Bershady, M. A., Law, D. R., Yan, R., Drory, N., MacDonald, N., Wake, D. A., Cherinka, B., Sánchez-Gallego, J. R., Weijmans, A.-M., et al. (2014). Overview of the sdss-iv manga survey: mapping nearby galaxies at apache point observatory. *The Astrophysical Journal*, 798(1):7.
- Cappellari, M. (2016). Structure and kinematics of early-type galaxies from integral field spectroscopy. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 54:597–665.
- Cortese, L., Catinella, B., e Smith, R. (2021). The dawes review 9: The role of cold gas stripping on the star formation quenching of satellite galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 38:e035.
- Delgado, R. G., Cervino, M., Martins, L. P., Leitherer, C., e Hauschildt, P. H. (2005). Evolutionary stellar population synthesis at high spectral resolution: optical wavelengths. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 357(3):945–960.
- Fraser-McKelvie, A., Brown, M. J., Pimblet, K., Dolley, T., e Bonne, N. J. (2018). Multiple mechanisms quench passive spiral galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474(2):1909–1921.
- Fraser-McKelvie, A. e Cortese, L. (2022). Beyond galaxy bimodality: the complex interplay between kinematic morphology and star formation in the local universe. *The Astrophysical Journal*, 937(2):117.
- Gu, Y., Fang, G., Yuan, Q., Cai, Z., e Wang, T. (2018). The morphological evolution, agn fractions, dust content, environments, and downsizing of massive green valley galaxies at  $0.5 < z < 2.5$  in 3d-hst/candels. *The Astrophysical Journal*, 855(1):10.
- Harborne, K., Van De Sande, J., Cortese, L., Power, C., Robotham, A., Lagos, C., e Croom, S. (2020). Recovering  $\lambda r$  and  $v/\sigma$  from seeing-dominated ifs data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(2):2018–2038.
- Hubble, E. P. (1937). *The realm of the nebulae*, volume 25. Yale University Press.
- Krajnović, D., Ural, U., Kuntschner, H., Goudfrooij, P., Wolfe, M., Cappellari, M., Davies, R., de Zeeuw, T. P., Duc, P.-A., Emsellem, E., et al. (2020). Formation channels of slowly rotating early-type galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 635:A129.

- Lim, S., Mo, H., Lu, Y., Wang, H., e Yang, X. (2017). Galaxy groups in the low-redshift universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470(3):2982–3005.
- Martins, L. P., Delgado, R. M. G., Leitherer, C., Cervino, M., e Hauschildt, P. (2005). A high-resolution stellar library for evolutionary population synthesis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358(1):49–65.
- Salim, S. (2015). Green valley galaxies. *arXiv preprint arXiv:1501.01963*.
- Salim, S., Lee, J. C., Janowiecki, S., Da Cunha, E., Dickinson, M., Boquien, M., Burgarella, D., Salzer, J. J., e Charlot, S. (2016). Galex–sdss–wise legacy catalog (gswlc): Star formation rates, stellar masses, and dust attenuations of 700,000 low-redshift galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 227(1):2.
- Salim, S., Rich, R. M., Charlot, S., Brinchmann, J., Johnson, B. D., Schiminovich, D., Seibert, M., Mallery, R., Heckman, T. M., Forster, K., et al. (2007). Uv star formation rates in the local universe. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173(2):267.
- Sánchez-Blázquez, P., Peletier, R., Jiménez-Vicente, J., Cardiel, N., Cenarro, A. J., Falcón-Barroso, J., Gorgas, J., Selam, S., e Vazdekis, A. (2006). Medium-resolution isaac newton telescope library of empirical spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371(2):703–718.
- Trussler, J., Maiolino, R., Maraston, C., Peng, Y., Thomas, D., Goddard, D., e Lian, J. (2020). Both starvation and outflows drive galaxy quenching. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(4):5406–5434.
- Vazdekis, A., Koleva, M., Ricciardelli, E., Röck, B., e Falcón-Barroso, J. (2016). Uv-extended e-miles stellar population models: young components in massive early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(4):3409–3436.
- Vazdekis, A., Sánchez-Blázquez, P., Falcón-Barroso, J., Cenarro, A., Beasley, M., Cardiel, N., Gorgas, J., e Peletier, R. (2010). Evolutionary stellar population synthesis with miles–i. the base models and a new line index system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404(4):1639–1671.
- Westfall, K. B., Cappellari, M., Bershady, M. A., Bundy, K., Belfiore, F., Ji, X., Law, D. R., Schaefer, A., Shetty, S., Tremonti, C. A., et al. (2019). The data analysis pipeline for the sdss-iv manga ifu galaxy survey: overview. *The Astronomical Journal*, 158(6):231.
- Wyder, T. K., Martin, D. C., Schiminovich, D., Seibert, M., Budavári, T., Treyer, M. A., Barlow, T. A., Forster, K., Friedman, P. G., Morrissey, P., et al. (2007). The uv-optical galaxy color-magnitude diagram. i. basic properties. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173(2):293.



# A Apêndice: Exemplos de galáxias de cada classe cinemática

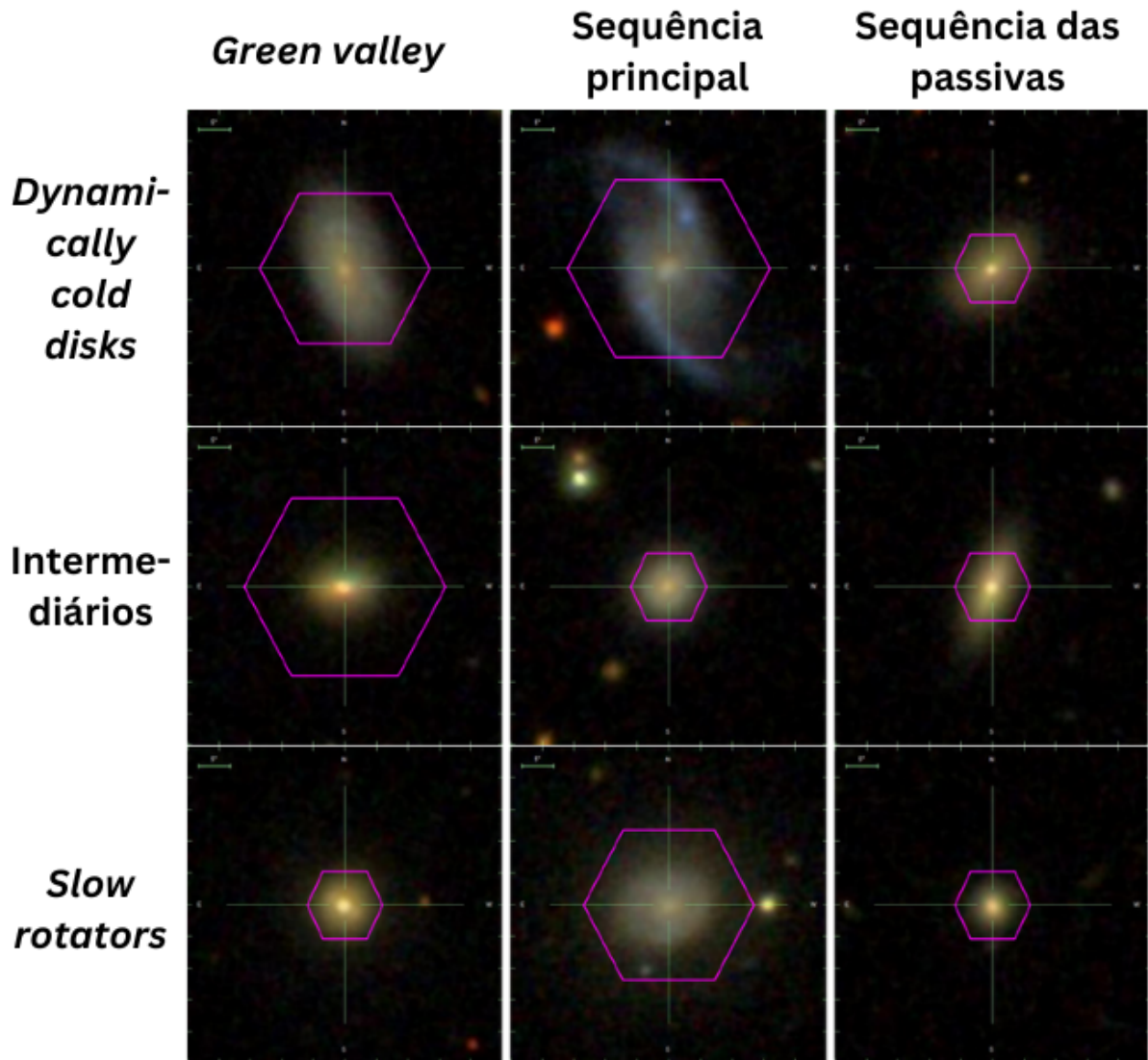


Figura A.1 – Exemplos de imagens do SDSS de galáxias centrais com  $\log (M/M_{\odot}) < 10$  de cada classe cinemática.

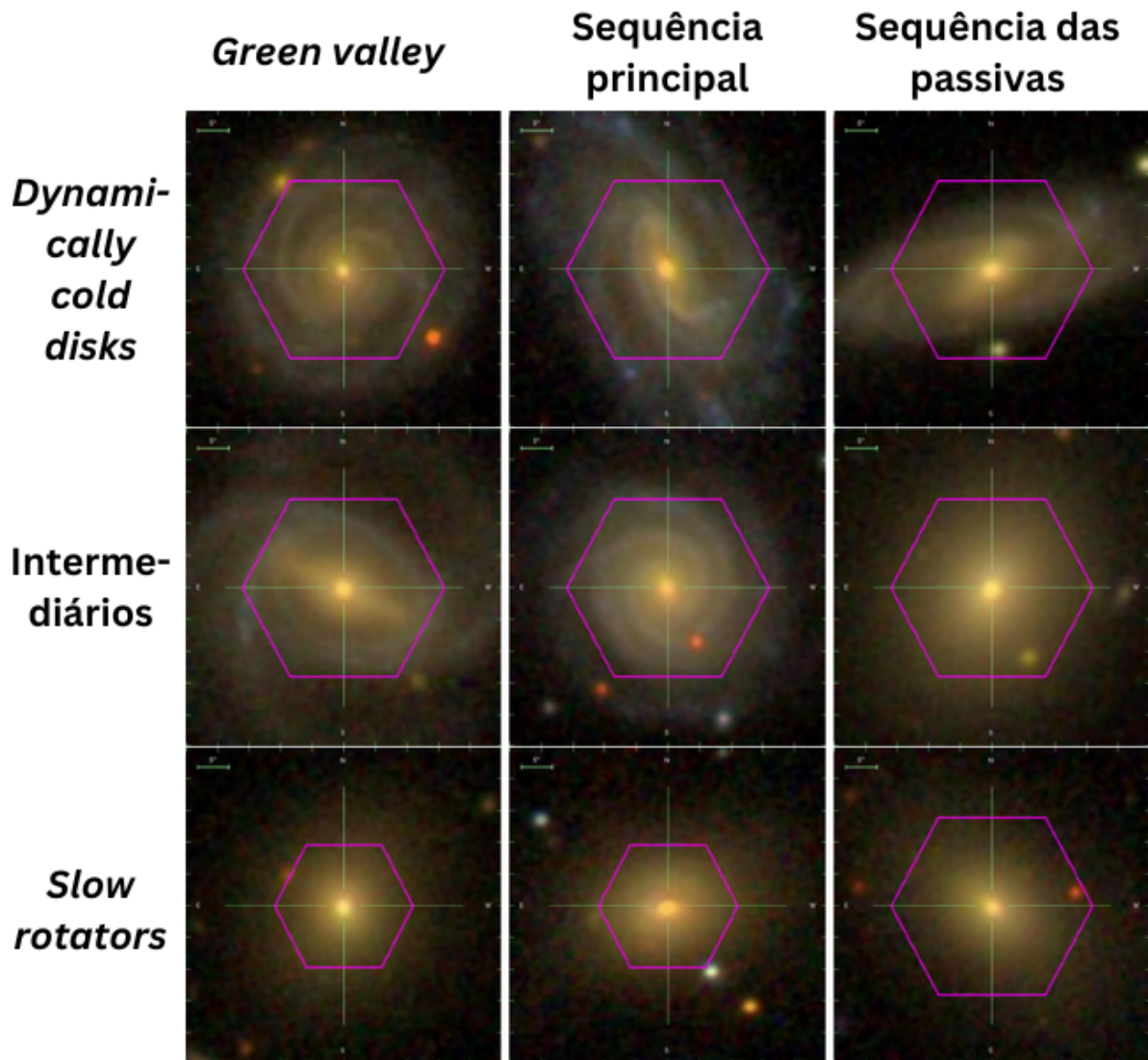


Figura A.2 – Exemplos de imagens do SDSS de galáxias centrais com  $\log (M/M_{\odot}) > 11$  de cada classe cinemática.

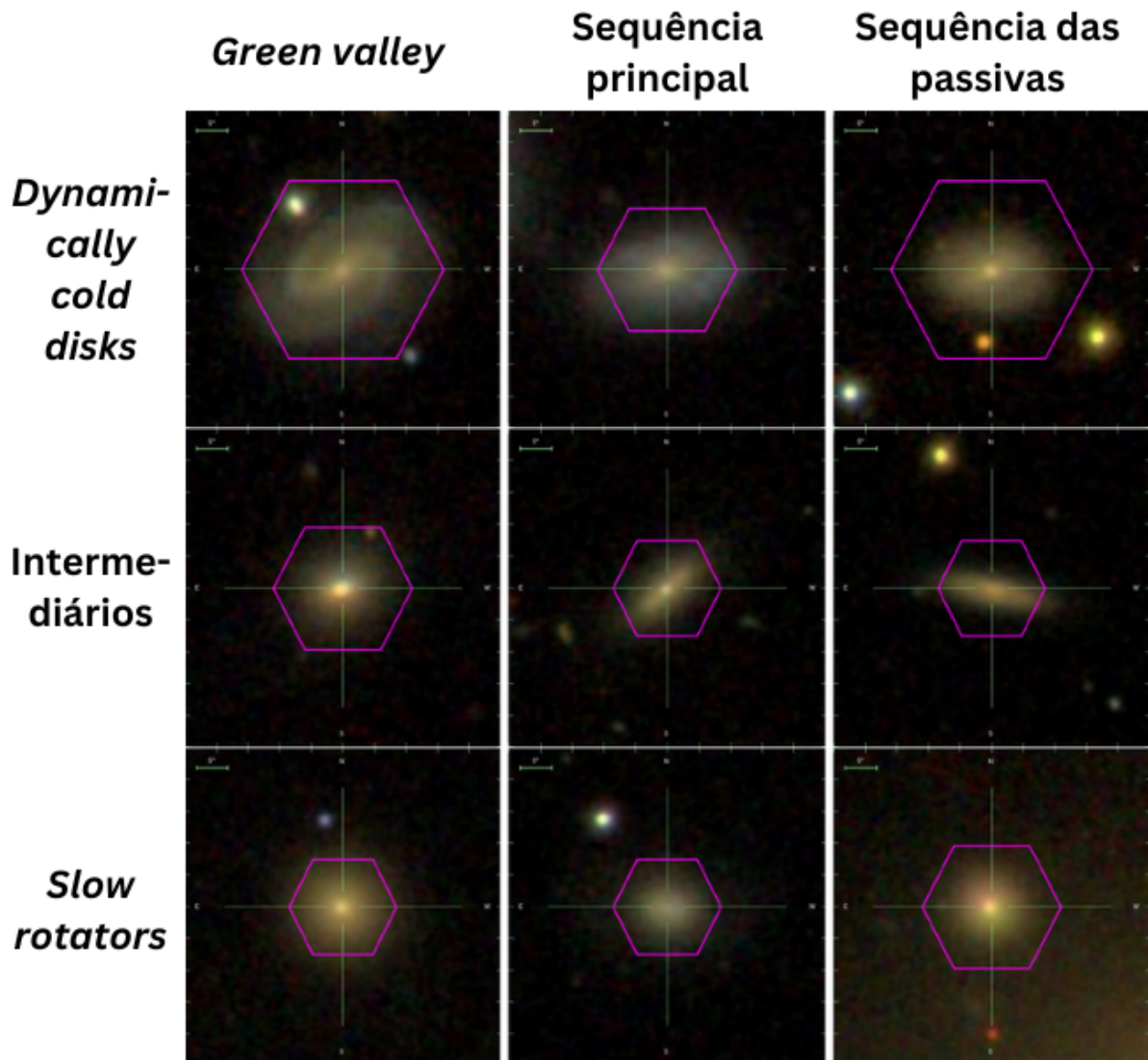


Figura A.3 – Exemplos de imagens do SDSS de galáxias satélites com  $\log (M/M_{\odot}) < 10$  de cada classe cinemática.

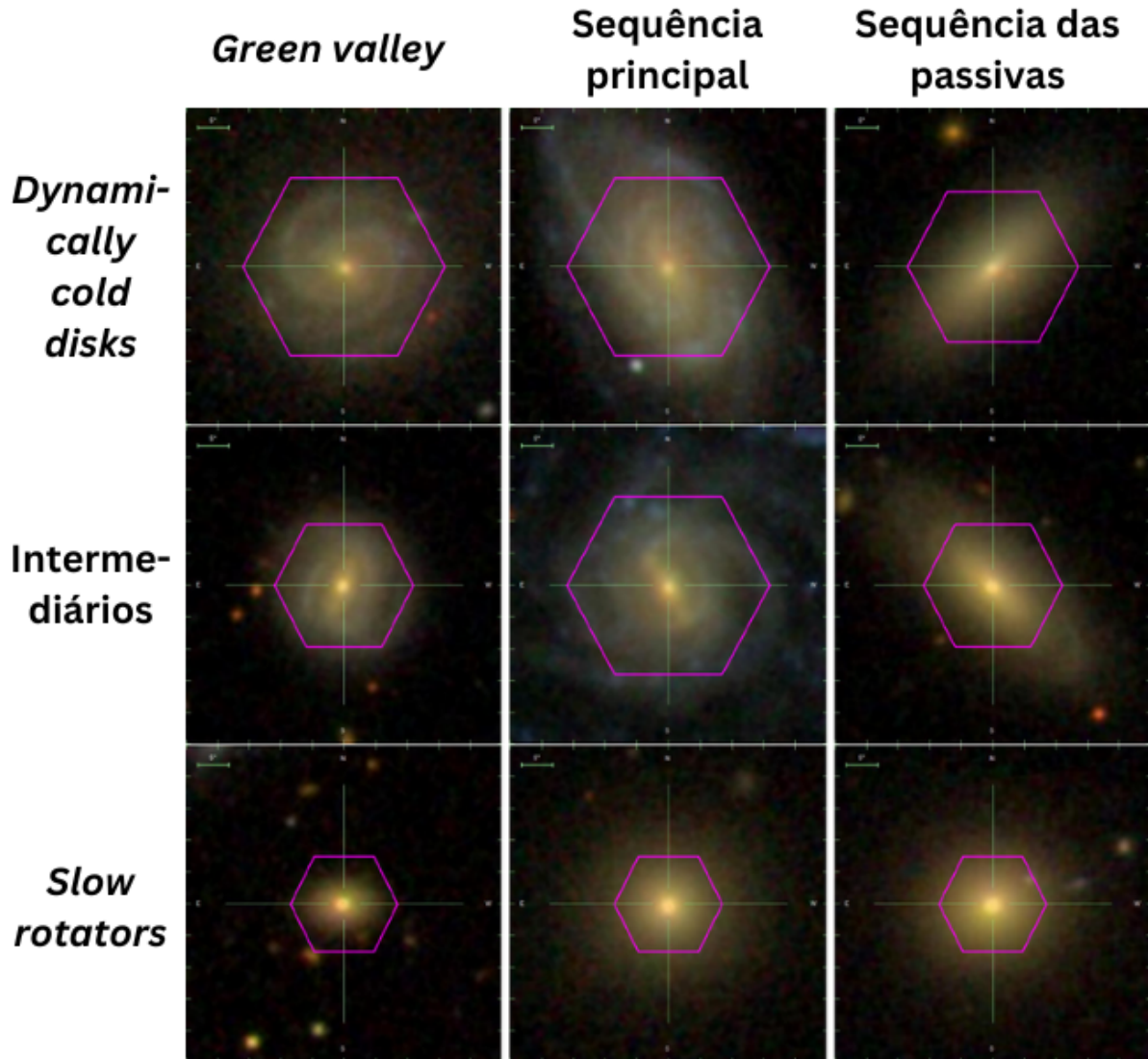


Figura A.4 – Exemplos de imagens do SDSS de galáxias satélites com  $10 < \log (M/M_{\odot}) < 11$  de cada classe cinemática.



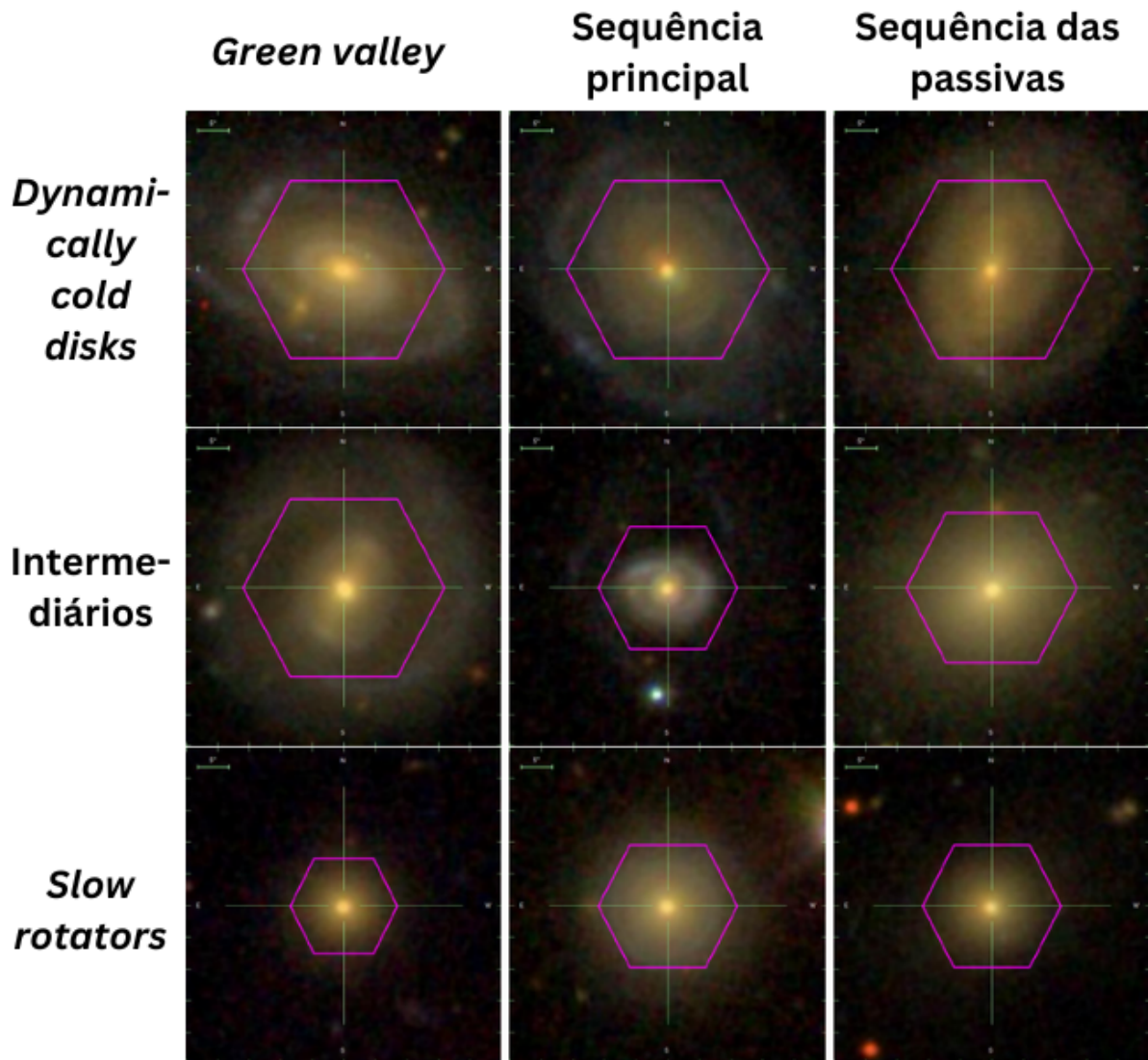


Figura A.5 – Exemplos de imagens do SDSS de galáxias satélites com  $\log (M/M_{\odot}) > 11$  de cada classe cinemática.