

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

Patricia Martins de Novais

**Resolvendo Galáxias: A morfologia da  
emissão em  $H\alpha$  nas galáxias do projeto  
CALIFA**

São Paulo

2019



Patricia Martins de Novais

**Resolvendo Galáxias: A morfologia da  
emissão em  $H\alpha$  nas galáxias do projeto  
CALIFA**

Tese apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Laerte Sodré Jr.

**Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.**

São Paulo

2019





*“Digo: o real não está na saída nem na chegada: ele se dispõe para a gente é no meio da travessia.”*

Guimarães Rosa

*À minha família!*



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer imensamente à minha família, que sempre confiou nos meus sonhos e no meu trilhar. À minha mãe, que sempre foi meu porto seguro, aquela que me ensinou a acreditar que dias melhores viriam. Aos meus irmãos, por serem meus melhores exemplos. Ao meu marido Walisson agradeço por todo companheirismo, todo apoio e carinho ao longo da jornada, por todas as vezes em que não me deixou sucumbir. Ao meu falecido pai, agradeço por me ensinar a ver a vida pelo prisma da aventura, do viver sem reservas, por me ensinar que se pode tudo, menos 'pisar no tomate'.

Ao meu orientador, professor Laerte Sodré Jr., agradeço simplesmente por tudo. Desde o início da minha jornada acadêmica, com a iniciação científica, mestrado e, agora, finalizando o doutorado, o professor Laerte foi sem dúvidas o melhor orientador que eu poderia ter tido, visto que sempre foi cuidadoso, paciente e muito comprometido com minha formação. Já são 12 anos de parceria, a qual eu sou muito grata!

Aos meus amigos de vida, Tamires, Natalia, Carla e Camila agradeço a jornada compartilhada, as dores divididas e as alegrias degustadas. Aos amigos que a academia me deu, Aninha, William, Nathalia, Carla, Miguel, Daiane, Marcelo, Felipe, Rodrigo, Marcus, Laura, Alberto, Estefania e Carol, agradeço por fazer os dias menos cansativos e a caminhada valer a pena.

Agradeço também a todos os professores que passaram pela minha vida, desde sempre, do jardim de infância à pós-graduação. Em especial, agradeço às professoras Mônica e Alessandra, por terem visto em mim potencial, me instigando a continuar na busca pelo conhecimento.

À Rosa González e ao Enrique Pérez, agradeço por terem me recebido tão bem em seu instituto, dividindo comigo seus conhecimentos.

Minha gratidão se estende também às PyLadies de São Paulo, que me possibilitou aprender Python de uma maneira mais tranquila, me ajudando em diversas etapas da minha pesquisa. À todas as meninas do grupo, meu sincero agradecimento.

Agradeço igualmente ao IAG e ao programa de Astronomia por me fornecer toda a estrutura, física e humana, necessárias para a perfeita execução do meu trabalho. Agradeço também ao IAA (Instituto de Astrofísica de Andalucía) por ter me recebido muito bem durante minha curta estada em suas instalações.

Por fim, agradeço à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro, essencial para o desenvolvimento do presente trabalho.

*“Querem que vos ensine o modo de chegar à ciência verdadeira? Aquilo que se sabe, saber que se sabe; aquilo que não se sabe, saber que não se sabe; na verdade é este o saber.”*

Confúcio

*“Pesquisa-dor é aquele sujeito que, mais longe o possível das amarras que lhe impõem os diversos ideais, mergulha – implicado todo o seu corpo – na tarefa única e, de resto, para cada um absolutamente singular, de pesquisar a dor específica de sua existência.”*

Claudia Riolfi



# Resumo

Muitos trabalhos têm sido realizados na tentativa de entender os mecanismos e processos pelos quais as galáxias passaram ao longo do tempo e que tiveram papel fundamental na determinação de muitos dos parâmetros observados. Dentre os indicadores desses mecanismos e processos, a emissão em  $H\alpha$  é uma importante característica muito utilizada para o entendimento das galáxias, tanto pela relativa facilidade de sua observação quanto pela quantidade de processos que podem ser rastreados com ela. Assim, o presente trabalho apresenta uma proposta de classificação dos perfis de emissão em  $H\alpha$  em galáxias do levantamento de céu CALIFA, além de estudar como tais perfis estão correlacionados com diversos parâmetros das galáxias, tanto estruturais quanto de populações estelares.

Dentre os parâmetros estruturais, são estudadas 3 concentrações: a concentração de luz na banda  $r$  e mais duas novas concentrações em  $H\alpha$ , também propostas pelo presente trabalho. Os perfis encontrados se mostraram correlacionados com as concentrações, mostrando-se como um parâmetro estrutural útil. Quanto aos parâmetros físicos, os perfis exibiram uma correlação bastante interessante com a idade estelar, massa estelar e metalicidade estelar, corroborando com os resultados obtidos para os parâmetros estruturais, no sentido de que os perfis propostos possuem um significado físico intrínseco.

Em uma última análise, estudamos ainda as possíveis origens da emissão  $H\alpha$  nos objetos da amostra, explorando como os perfis apresentados podem ser justificados por essa origem, discutindo também as possíveis correlações com outros estudos envolvendo propriedades derivadas dessa emissão.

Ainda que a amostra utilizada no presente estudo seja pequena, os resultados encontrados mostram que tal classificação pode ser útil para entendermos melhor como se formam e evoluem as galáxias, de modo que sua aplicação em dados de projetos e *surveys* maiores,

com amostras de galáxias mais amplas em quantidade e variedade, poderá ressaltar ainda mais os resultados encontrados, consolidando-se como importante um instrumento dentre o rol de ferramentas com as quais podemos estudar as galáxias.



# Abstract

Many works have been carried out in an attempt to understand the mechanisms and processes by which the galaxies have passed over time and that have played a fundamental role in determining many of the observed parameters. Among the indicators of these mechanisms and processes, the emission in  $H\alpha$  is an important feature that is widely used to understand the galaxies, both by the relative ease of their observation and by the number of processes that can be traced with it. The present work presents a proposal to classify the emission profiles in  $H\alpha$  in galaxies of the CALIFA sky survey, besides studying how such profiles are correlated with several parameters of galaxies, both structural and stellar populations.

We study the correlation between the profiles and three concentrations: the light concentration in the r band and two new concentrations in  $H\alpha$ , also proposed by the present work. We found that the profiles are correlated with the concentrations, indicating that these profiles are related with structural parameters of galaxies. We also analyzed the relation of profiles with stellar population properties. Our findings showed a very interesting correlation with stellar age, stellar mass and stellar metallicity, corroborating with the results obtained for the structural parameters, in the sense that the proposed profiles have an intrinsic physical meaning.

Finally, we also study the possible source of the  $H\alpha$  emission in the objects, exploring how the proposed profiles can be justified by these origins, also discussing the possible correlations with other studies involving properties derived from this emission.

Although the sample used in this study contains just a few objects, the results found show that such classification may be useful to better understand how the galaxies form and evolve, so that the application of such technique of classification in other projects and

surveys with larger sample of galaxies, both in quantity and variety, may highlight the results found, consolidating as an important instrument among the tools with which we can study the galaxies.

# Lista de Figuras

1.1	Diagrama de Hubble . . . . .	22
1.2	Bimodalidade das propriedades das galáxias . . . . .	23
1.3	Exemplo de espectros de linhas de emissão . . . . .	25
1.4	Relação massa-metalicidade . . . . .	26
1.5	Relação idade-metalicidade: late-types . . . . .	27
1.6	Relação idade-metalicidade: early-types . . . . .	28
1.7	Diagrama BPT do SDSS/DR8 . . . . .	32
1.8	IFU: comparações . . . . .	35
1.9	Esquema de um IFU . . . . .	36
2.1	Diagrama cor-magnitude do CALIFA . . . . .	40
2.2	Cobertura espectral - CALIFA . . . . .	40
2.3	Comparação entre os métodos de binagem espacial . . . . .	42
2.4	Proporção dos tipos de Hubble no CALIFA . . . . .	46
2.5	Proporção de classes morfológicas . . . . .	47
2.6	Distribuição da classe morfológica da amostra . . . . .	48
2.7	Diagrama BPT da amostra . . . . .	49
2.8	Mosaico com imagens RGB da amostra . . . . .	52
3.1	Distribuição das concentrações $c_r$ , $c_e(H\alpha)$ e $c_c(H\alpha)$ . . . . .	57
3.2	Correlação de $c_r$ com $c_c$ e $c_e$ . . . . .	58
3.3	Correlação entre $c_c$ e $c_e$ . . . . .	58
4.1	Perfil de $H\alpha$ - Ajuste de elipses . . . . .	60
4.2	Perfil de $H\alpha$ - NGC0237 . . . . .	61

4.3	Distribuição do raio de máxima emissão em $H\alpha$ . . . . .	62
4.4	Distribuição das concentrações para os perfis C e EX . . . . .	62
4.5	Perfis de $H\alpha$ : exemplos . . . . .	63
4.6	Proporção das classes morfológicas em cada tipo de perfil . . . . .	64
4.7	Distribuição das concentrações para os perfis CE, CL e EX . . . . .	65
4.8	Boxplot das concentrações . . . . .	66
4.9	Violinplot e Stripplot da idade média em cada tipo de perfil . . . . .	68
4.10	Violinplot e Stripplot da metalidade média em cada tipo de perfil . . . . .	68
4.11	Violinplot e Stripplot da masa estelar em cada tipo de perfil . . . . .	69
4.12	Diagrama BPT dos perfis . . . . .	71
A.1	Imagens e perfis de $H\alpha$ . . . . .	99
A.2	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	100
A.3	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	101
A.4	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	102
A.5	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	103
A.6	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	104
A.7	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	105
A.8	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	106
A.9	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	107
A.10	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	108
A.11	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	108
A.12	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	109
A.13	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	110
A.14	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	111
A.15	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	112
A.16	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	113
A.17	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	114
A.18	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	115
A.19	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	116
A.20	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	117
A.21	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	118

A.22	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	119
A.23	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	120
A.24	Imagens e perfis de $H\alpha$ - cont. . . . .	121



# Lista de Tabelas

1.1	Linhas de emissão comuns . . . . .	30
2.1	Classificação das galáxias em classes morfológicas . . . . .	47
2.2	Principais características da amostra de galáxias . . . . .	49
4.1	Tabela de contingência . . . . .	64
4.2	Valores médios e o erro padrão das concentrações e propriedades das populações estelares . . . . .	66
B.1	Características derivadas para a amostra de galáxias . . . . .	123





# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	21
1.1 Galáxias: Um Breve Panorama . . . . .	21
1.1.1 Classificações Morfológicas e Bimodalidade . . . . .	22
1.1.2 Populações Estelares . . . . .	24
1.1.3 Idade, Metalicidade e Massa Estelar: Algumas Relações . . . . .	25
1.1.4 Perfis de Brilho e Concentrações . . . . .	27
1.2 Espectros e Linhas de Emissão . . . . .	29
1.2.1 Emissão em $H\alpha$ . . . . .	30
1.3 Os Novos Surveys . . . . .	33
1.3.1 Espectroscopia de Campo Integral . . . . .	35
1.4 Motivação do trabalho . . . . .	37
2. <i>Base de dados</i> . . . . .	39
2.1 O Levantamento CALIFA . . . . .	39
2.2 Pipe3D - <i>Dataproducts</i> do CALIFA . . . . .	41
2.3 Nossa amostra . . . . .	44
2.3.1 Correção da extinção nebular . . . . .	44
2.3.2 Classes Morfológicas . . . . .	46
2.3.3 Caracterização da amostra . . . . .	47
3. <i>Estimadores Geométricos e Estruturais da Distribuição da Emissão em <math>H\alpha</math></i> . . . . .	53
3.1 Momentos invariantes de imagem . . . . .	53
3.1.1 Parâmetros Geométricos de Elipse . . . . .	54
3.1.2 Raio médio e seu desvio padrão . . . . .	55

3.2	Medidas de Concentração . . . . .	55
3.2.1	Concentração Efetiva e Central em $H\alpha$ . . . . .	56
3.3	Considerações Sobre as Concentrações . . . . .	57
4.	<i>Emissão em <math>H\alpha</math>: Distribuição Radial, Propriedades e Análises</i> . . . . .	59
4.1	Perfis: Distribuição Radial de $H\alpha$ . . . . .	59
4.2	Classificação Visual dos Perfis de $H\alpha$ . . . . .	61
4.3	A Morfologia das Galáxias e Seus Perfis . . . . .	63
4.4	Correlações com os Parâmetros de Concentração . . . . .	65
4.5	Perfis de $H\alpha$ e as Propriedades das Populações Estelares . . . . .	66
4.5.1	Idade e Metalicidade . . . . .	66
4.5.2	Massa Estelar Média . . . . .	69
4.6	Natureza das emissões em $H\alpha$ . . . . .	70
4.7	Considerações sobre os perfis . . . . .	72
5.	<i>Conclusões</i> . . . . .	73
6.	<i>Perspectivas e Trabalhos Futuros</i> . . . . .	77
	<i>Referências</i> . . . . .	79
	<i>Apêndice</i> . . . . .	97
A.	<i>Imagens e Perfis Radiais em <math>H\alpha</math></i> . . . . .	99
B.	<i>Tabelas de Propriedades</i> . . . . .	123

## Introdução

Uma das principais tarefas da astrofísica extragaláctica é entender como as galáxias, objetos tão peculiares, se formaram, evoluíram e estão correlacionadas aos demais eventos que ocorreram ao longo da história do Universo. Descrever suas características, entender sua formação e os mecanismos responsáveis por suas principais propriedades, sejam físicas, morfológicas ou estruturais, é a ocupação dos principais estudos atuais. Dada a relevância do tema, o presente capítulo apresenta os principais conceitos utilizados e abordados ao longo da tese, trazendo uma visão geral das galáxias através de suas propriedades, modalidades e estruturas. Ainda, serão apresentados conceitos pertinentes às linhas de emissão e espectroscopia de campo integral, e as motivações do presente trabalho.

### *1.1 Galáxias: Um Breve Panorama*

As galáxias são objetos que permeiam todo o cosmo, com suas múltiplas formas, cores e idades, repletas de estrelas, gás e poeira. Sendo um importante componente na teia cósmica do universo, entender como esses objetos se formaram e evoluíram ao longo do tempo é uma tarefa difícil, porém fundamental. Ainda que haja registros muito antigos a respeito da existência das galáxias, somente nos últimos 100 anos foi possível entendermos melhor a sua natureza e suas propriedades e compreender como tais características se correlacionam com os diversos processos que ocorrem nesses objetos. Assim, a seguir, será feita uma explanação a respeito do que se sabe sobre as galáxias, suas classificações, propriedades e populações estelares.

### 1.1.1 Classificações Morfológicas e Bimodalidade

As primeiras galáxias observadas, principalmente a olho nu, eram chamadas erroneamente de nebulosas devido às suas características de corpo extenso difuso e foi somente com o advento dos primeiros telescópios que foi possível começar a resolver esses corpos e perceber a enorme fauna a qual eles pertencem. Os trabalhos de Wolf (1908), Lundmark (1926) e Hubble (1926) foram alguns dos primeiros trabalhos voltados para a classificação sistemática das galáxias, sendo o diagrama de diapasão (*Hubble Tuning Fork*, Hubble (1936b)) o mais famoso esquema de classificação. Desde então, muitos outros esquemas de classificação foram propostos, sempre tentando descrever as galáxias com a maior precisão possível e tentando relacionar as suas características morfológicas com outras propriedades físicas (de Vaucouleurs (1959); Sandage et al. (1975); Elmegreen e Elmegreen (1982); Roberts e Haynes (1994); Sodre e Cuevas (1997); Van den Bergh (1998); Kennicutt (1998); Strateva et al. (2001); Nair e Abraham (2010); Casado et al. (2015); González Delgado et al. (2016), para citar alguns exemplos). A figura 1.1 exibe um esquema simplificado com 3 variações do diagrama de Hubble, onde se pode notar a inserção de vários outros tipos de galáxias que não estavam contemplados no esquema original (Van den Bergh, 1998), tais como as galáxias lenticulares (S0), as galáxias irregulares e até mesmo a diferenciação de galáxias elípticas quanto a sua forma *disky* ou *boxy*.

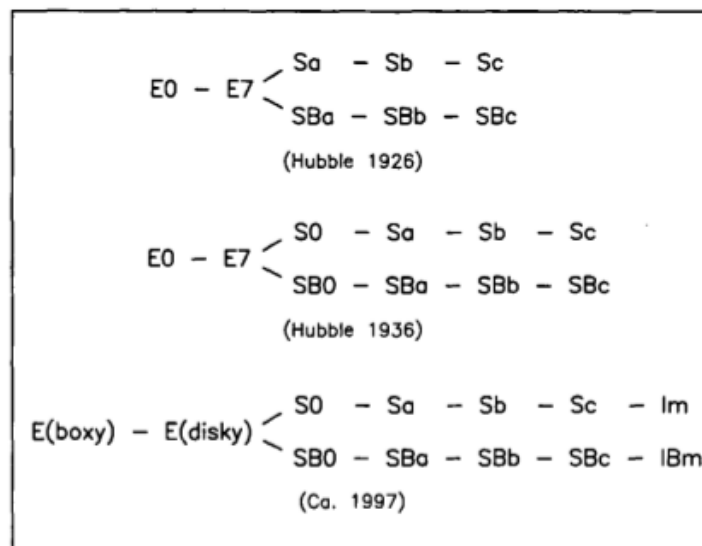


Figura 1.1: Esquema mostrando três versões distintas do diagrama de Hubble para a classificação de galáxias (Van den Bergh, 1998), onde nota-se a inserção de novos objetos nos diagramas mais recentes.

Trabalhos recentes, entretanto, sugerem um panorama mais geral em que as galáxias do universo local possuem bimodalidades em diversas de suas propriedades, tais como cor, massa estelar, taxa de formação estelar e outros (Strateva et al., 2001; Martínez et al., 2006; Baldry et al., 2006; Mateus et al., 2006; Zibetti et al., 2017; Nelson et al., 2018). Dentro desse cenário, as galáxias podem ser separadas em *early-type* e *late-type*, sendo as primeiras caracterizadas por galáxias mais velhas, mais vermelhas, metálicas, massivas e com formação estelar quase nula (Trager et al., 2000; Conselice, 2006; van Dokkum e van der Marel, 2007). Já as galáxias *late-type* são caracterizadas por objetos mais novos, mais azuis, menos metálicos, com menores massas estelares e ativa formação estelar (Bell et al., 2003; Baldry et al., 2004; Blanton e Moustakas, 2009; González Delgado et al., 2016). As *early-types* são, geralmente, galáxias do tipo elíptico ou lenticular, enquanto que as *late-types* são dominadas por galáxias espirais (com e seu barra) e irregulares. A figura 1.2, extraída de Mateus et al. (2006), mostra a distribuição da concentração  $C$ , da cor  $u-r$  e da quebra em  $4000\text{\AA}$  para quase 50000 galáxias do DR2 do SDSS, onde nota-se a bimodalidade dessas propriedades, principalmente quando consideramos os casos das galáxias *star-forming* (linha azul escura) e galáxias passivas (linha vermelha).

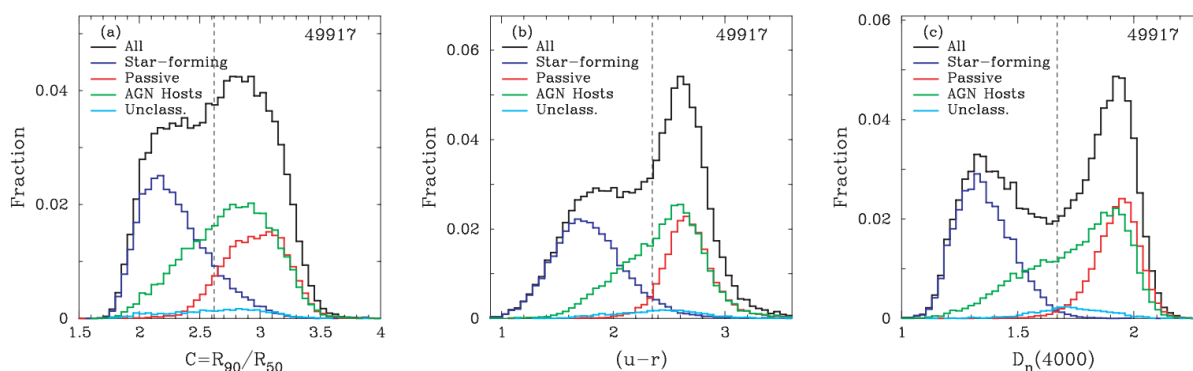


Figura 1.2: A distribuição de concentração  $C$ , cor  $u-r$  e quebra em  $4000\text{\AA}$  para cerca de 50000 objetos, do SDSS/DR2, mostrando a bimodalidade dessas propriedades nas galáxias. Figura extraída de Mateus et al. (2006).

Tanto as classificações propostas no início do século XX quanto as classificações bimodais mais recentes poderão ser ampliadas significativamente com o advento dos novos *surveys* e novas tecnologias. Dados de melhor qualidade, grande variedade de informações e métodos robustos de análise podem expandir a visão atual de como as galáxias se formaram e estão evoluindo, aprimorando nosso conhecimento do universo.

### 1.1.2 Populações Estelares

Numa aproximação simplista e visual, as galáxias podem ser entendidas como um amontoado de estrelas, de tal forma que não é possível estudar as galáxias sem compreender qual o papel das estrelas que as compõem. Entretanto, exceto para objetos muito próximos, como as Nuvens de Magalhães ou objetos do Grupo Local, resolver individualmente as estrelas é uma empreitada praticamente impossível, fazendo-se então necessário o uso do conceito de populações estelares, que são conjuntos de estrelas com características e propriedades similares entre si. Dentre as propriedades que podemos estudar através das populações estelares podemos citar, dentre outros, a idade, metalicidade, histórico de formação estelar e a massa.

Uma vez que as estrelas não podem ser resolvidas na maior parte dos objetos astronômicos, o uso de espectros integrados é bastante difundido como alternativa para compreender as populações estelares nas galáxias. Um espectro integrado de uma galáxia é formado pela emissão contínua oriunda das estrelas; por linhas de emissão proveniente de regiões ionizadas, choques no meio interestelar ou por núcleos ativos; e por linhas de absorção resultantes da absorção de luz pelas atmosferas estelares, por gás e/ou poeira. A figura 1.3, extraída de Ho (2008), mostra o espectro de 3 tipos de galáxias (uma Seyfert, uma LINER e uma galáxia espiral), em que é fácil notar as três componentes do espectro.

A parte contínua do espectro, como mencionado, é produzida pelas estrelas que compõem a galáxia, de modo que é possível interpretar o espectro de uma galáxia como uma combinação linear dos espectros das populações estelares nela presente. Todavia, decompor o espectro de uma galáxia em diversos espectros estelares não é algo trivial, fazendo necessário o desenvolvimento de métodos de sínteses espectrais. Atualmente há diversos métodos de síntese espectral, tanto empíricos quanto evolutivos, dentre os quais podemos citar os trabalhos de Tinsley e Gunn (1976); Tinsley (1980); Leitherer et al. (1999); Bruzual e Charlot (2003) e Cid Fernandes et al. (2005).

Um dos pioneiros a relacionar as populações estelares à outras características das galáxias foi Baade (1944), que separou as populações de estrelas em dois tipos principais, população do tipo I e população do tipo II, mostrando que as populações do tipo II seriam comumente encontradas em galáxias elípticas e bojos enquanto populações do tipo I seriam mais frequentes nos braços de galáxias espirais. Desde então, muitos trabalhos

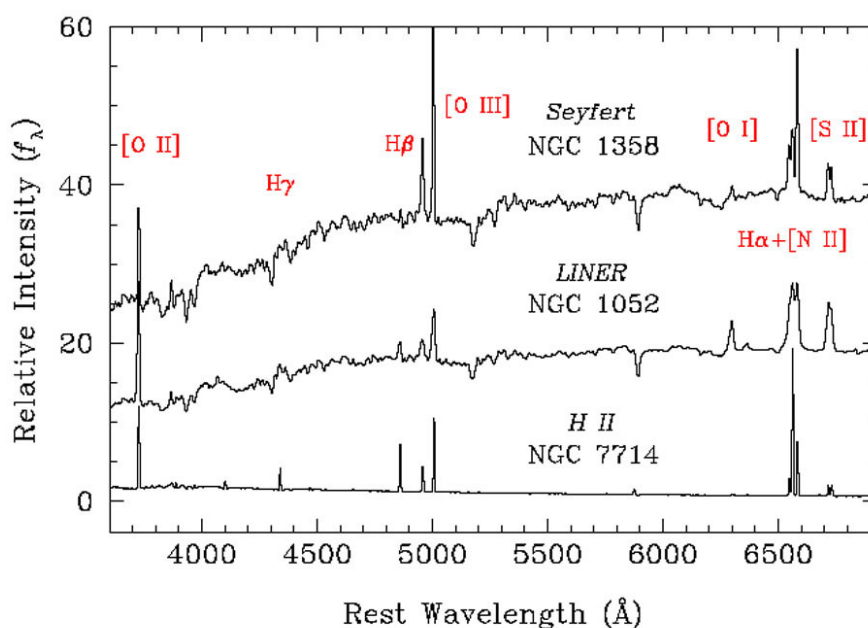


Figura 1.3: Espectro de três objetos distintos (uma Seyfert, um LINER e uma região HII), exemplificando a fauna de espectros com linhas de emissão. Figura extraída de Ho (2008).

têm sido realizados com o intuito de aprimorar o conhecimento sobre qual o papel das propriedades das populações estelares nas demais características das galáxias.

### 1.1.3 Idade, Metalicidade e Massa Estelar: Algumas Relações

Idade, metalicidade, massa estelar e taxa de formação estelar são parâmetros extremamente úteis na caracterização das populações estelares e que fornecem informações valiosas sobre as galáxias. Particularmente, as idades e metalicidades das populações estelares no universo local são ótimos traçadores diretos da formação estelar e enriquecimento químico presentes no interior das galáxias (Gallazzi et al., 2005), ainda que a determinação precisa da contribuição de ambos seja bastante dificultada pela presença da degenerescência idade-metalicidade. Inúmeros estudos mostraram que tanto a metalicidade quanto a idade estelar estão intimamente ligadas à massa da galáxia: objetos do tipo *early-type*, mais massivos, apresentam uma população estelar mais velha e metálica do que os objetos *late-type*, menos massivos (Gallazzi et al., 2005).

Das relações entre as propriedades das populações estelares, a relação massa-metalicidade é uma relação bastante estudada, principalmente após o trabalho de Tremonti et al. (2004), que mostrou existir uma forte correlação entre a massa estelar da galáxia e a metalicidade

nebular da mesma. Desde então, vários outros estudos foram realizados para confirmar a relação entre essa massa e a metalicidade em diversos redshifts, mostrando que essa relação se preserva ao longo da história do Universo (Erb et al., 2006; Maiolino et al., 2008; Maier et al., 2014; Ma et al., 2016; Leethochawalit et al., 2018). Analisando a massa estelar e a metalicidade estelar, ao invés da metalicidade nebular, de 300 galáxias do CALIFA, González Delgado et al. (2014) mostraram que a relação massa-metalicidade se preserva, ainda que a inclinação da relação seja mais íngreme do que quando utilizando metalicidade nebular. A figura 1.4, retirada de González Delgado et al. (2014), exhibe a relação massa-metalicidade estelar para 300 galáxias.

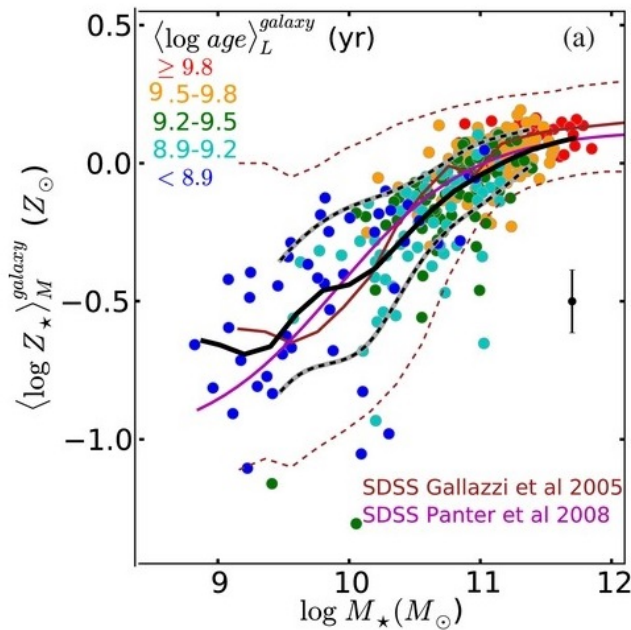


Figura 1.4: Relação massa-metalicidade estelar para 300 galáxias do CALIFA (González Delgado et al., 2014), com os pontos coloridos indicando a variação de idade estelar. A linha preta indica a tendência geral observada para a amostra e as linhas marrom e magenta representam a relação massa-metalicidade obtida por Gallazzi et al. (2005) e Panter et al. (2008).

A idade estelar possui forte correlação tanto com a metalicidade quanto com a massa estelar, dois primeiros ótimos traçadores da formação estelar e enriquecimento químico das galáxias (Gallazzi et al., 2005). A determinação precisa dessas duas grandezas é particularmente afetada pela conhecida degenerescência idade-metalicidade, pois tanto um aumento na metalicidade quanto um aumento na idade da população estelar pode produzir um mesmo efeito na cor da galáxia (Worthey, 1994; Maraston et al., 2003). Ainda, vários



estudos mostraram que a idade estelar média de galáxias do tipo *early-type* são majoritariamente mais velha do que galáxias do tipo *late-type*, ainda que nesse último tipo possam existir populações estelares mais velhas nos bojos e halos (Kauffmann, 1996; Trager et al., 2000; Zhu et al., 2010; Fritz et al., 2014; Díaz-García et al., 2018). As figuras 1.5 e 1.6 mostram a distribuição de densidade para a relação entre idade e metalicidade em diferentes *bins* de massa estelar para galáxias *late-types* e *early-types*, respectivamente, extraída de Gallazzi et al. (2005), em que nota-se a degenerescência entre a idade e a metalicidade em todas as faixas de massa. Ainda nas figuras 1.5 e 1.6, é possível confirmar que os objetos com maiores massas estelares também são os mais velhos e mais metálicos.

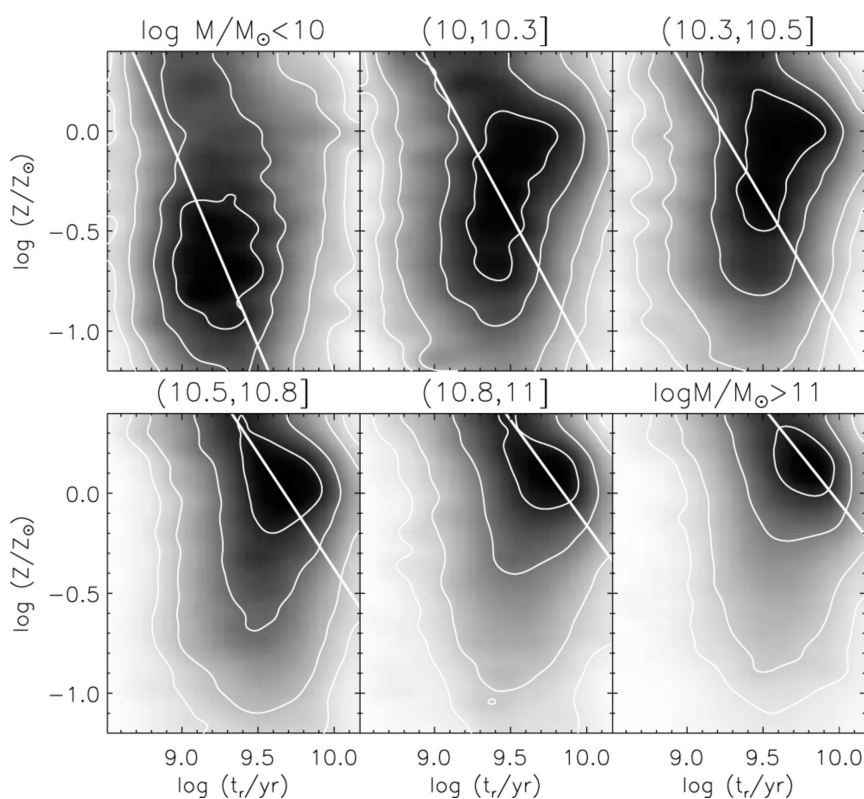


Figura 1.5: Distribuição da densidade de probabilidade da relação idade-metalicidade estelar para quase 6000 galáxias *late-types* do SDSS/DR2, obtido por Gallazzi et al. (2005), divididos em 6 intervalos de massa estelar. A linha branca indica a inclinação média da degenerescência idade-metalicidade.

#### 1.1.4 Perfis de Brilho e Concentrações

Estudar e compreender as estruturas das galáxias é uma importante forma de classificá-las e entendê-las, uma vez que elas podem trazer informações valiosas sobre os processos que aconteceram dentro das galáxias no universo local e em altos redshifts, fazendo possível

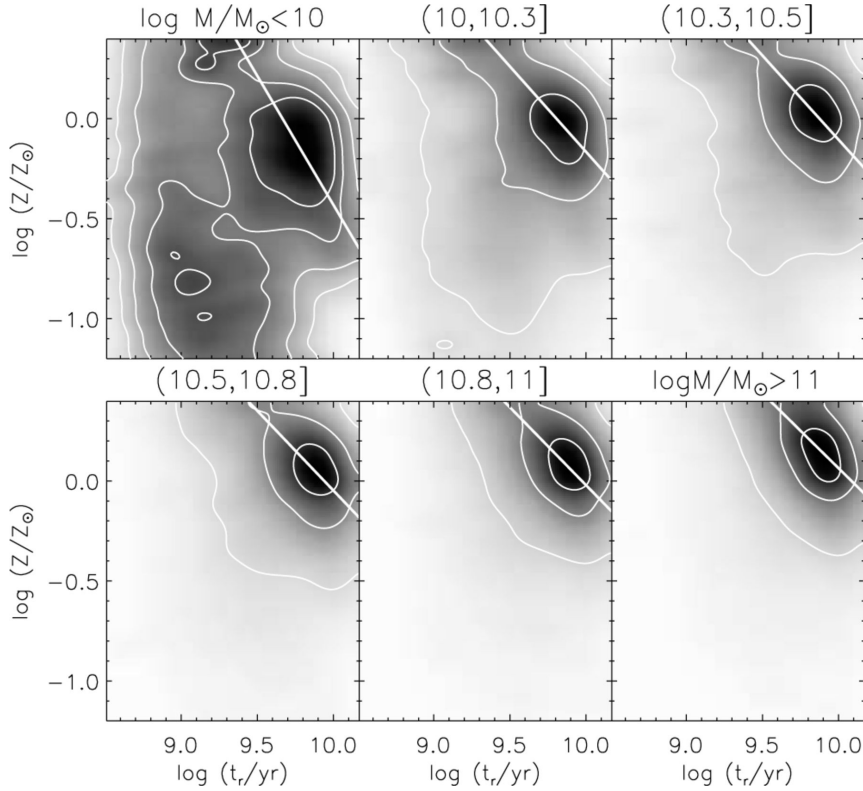


Figura 1.6: Idem figura 1.5, para mais de 26000 galáxias *early-type*.

estudos evolutivos das mesmas (Conselice, 2014). As classificações morfológicas mencionadas na seção 1.1.1 foram alguns dos primeiros trabalhos voltados à descrição e classificação das galáxias a partir da estrutura visual das mesmas, sendo seguida então por tentativas de descrição de estruturas através do brilho, dos raios, semi-eixos, grau de espiralidades, razões entre bojos e discos, formato triaxial e outros.

Do ponto de vista paramétrico, dois trabalhos cruciais foram os desenvolvidos por de Vaucouleurs (1948) e Sérsic (1963) que buscaram descrever as galáxias em termos do seu perfil de brilho. Sérsic (1963) postulou que o perfil de brilho de uma galáxia poderia ser descrito através da equação

$$I(R) = I_0 \exp\left\{-b\left(\left[\frac{R}{R_e}\right]^{1/n} - 1\right)\right\}$$

em que  $I_0$  é o brilho central e  $R_e$  é o raio efetivo contendo 50% da luz total da galáxia. O perfil de Sérsic (1963) se reduz à lei de de Vaucouleurs (1948) para galáxias elípticas e/ou componentes esféricos quando  $n = 4$ , enquanto galáxias do tipo disco tendem a ter  $n \sim 1$ . Os perfis de Sérsic e de de Vaucouleurs foram utilizados em diversos trabalhos, mostrando que a descrição das galáxias através desses perfis tinha uma direta relação com

outras propriedades relevantes (Caon et al., 1993; Kormendy e Kennicutt, 2004; Graham e Driver, 2005; Merritt et al., 2006; Gadotti, 2009, para citar alguns exemplos.).

Além dos perfis de luz de Sérsic e de Vaucouleurs, o uso da distribuição radial de outras propriedades das galáxias é bastante interessante, pois ajuda a entender como tais propriedades se comportam ao longo da galáxia (Tacchella et al., 2018; Belfiore et al., 2018). Outro parâmetro estrutural bastante difundido e relativamente fácil de medir é a concentração, que mostra ainda ter correlação com outras características físicas e estruturais das galáxias (Okamura et al., 1984; Graham et al., 2001; Abraham et al., 2003).

Graham et al. (2001) discutem diversas definições da concentração utilizando diferentes raios e quais as possíveis conexões com a estrutura e dinâmica das galáxias. Considerando a concentração de luz, por exemplo, Conselice (2003) definiu a concentração como sendo a razão entre os raios que contêm que 80% e 20% da curva da curva de crescimento

$$c = 5 \log (r_{80}/r_{20})$$

propondo que galáxias elípticas e esferoidais teriam  $C > 4$  enquanto que galáxias do tipo disco teriam  $3 < c < 4$ .

Outro exemplo de concentração é dado por Strateva et al. (2001), que propuseram a concentração de luz como sendo a razão entre os raios de Petrosian contendo 90% e 50% ( $R_{90}$  e  $R_{50}$ ) do fluxo na banda r, através de

$$c_r = \frac{R_{90}}{R_{50}}.$$

Strateva et al. (2001) ainda mostram que há uma boa correlação entre a concentração na banda r e a cor u-r, propondo também a concentração como um separador morfológico, em que objetos com  $c_r < 2.63$  são classificados como *late-types* e objetos com  $c_r > 2.63$  classificados como *early-types*. O primeiro gráfico da esquerda apresentado na figura 1.2 mostra a distribuição da concentração  $c_r$  tal qual proposta por Strateva et al. (2001), em que nota-se realmente uma distinção entre os valores dos picos de distribuição da concentração para as galáxias *star-forming* e passivas.

## 1.2 Espectros e Linhas de Emissão

Como mencionado na seção 1.1.2, o espectro integrado utilizado em grande parte dos estudos de galáxias é composto, além da emissão contínua, pela presença de linhas de

emissão, oriundas de regiões ionizadas nas galáxias. O entendimento da física dos gases ionizados é uma importante ferramenta para compreendermos não somente a natureza das galáxias, mas também a das estrelas, nebulosas, núcleos ativos e demais objetos astrofísicos. As linhas de emissão advindas dos gases ionizados são amplamente utilizadas para caracterizar e entender as informações a respeito da composição química dos objetos, a natureza das fontes ionizantes, a cinemática dos gases e até mesmo para determinar os redshifts dos objetos estudados. Na figura 1.3, as linhas de emissão estão destacadas em vermelho, enquanto a tabela 1.1 contém o comprimentos de onda de algumas das principais linhas de emissão presentes em objetos extragalácticos.

Tabela 1.1 - Linhas de emissão mais comumente encontradas em espectros de galáxias.

Linha	$\lambda$ (Å)
[OII]	3726,3729
H $\epsilon$	3970
H $\delta$	4102
H $\gamma$	4340
H $\beta$	4861
[OIII]	4959,5007
[OI]	6300
[NII]	6548,6583
H $\alpha$	6563
[SII]	6717,6731

### 1.2.1 Emissão em H $\alpha$

Cada linha de emissão presente no espectro de uma galáxia revela informações sobre características e processos importantes que aconteceram ou acontecem dentro delas. Dentre as principais linhas de emissão, a linha de H $\alpha$  é uma linha muito utilizada uma vez que através dela é possível determinar diversas propriedades, sendo uma linha menos afetada pela poeira e pela extinção atmosférica do que outras linhas mais azuis, além de ainda, para objetos em baixo redshift, estar localizada na região visível do espectro (Kennicutt, 1998; Catalán-Torrecilla et al., 2015).

A emissão em H $\alpha$  é originada da transição eletrônica, no átomo de hidrogênio, do nível 3 para o nível 2, também conhecida como a primeira transição da série de Balmer,

e equivale ao comprimento de onda de  $6563\text{\AA}$  (correspondente, no referencial de repouso, à banda r do SDSS). A emissão em  $H\alpha$  é produzida principalmente em regiões ionizadas por estrelas jovens e massivas do tipo O ou B, tais como as as regiões de intensa formação estelar. Não por acaso, essa emissão é bastante utilizada como um traçador de atividade estelar, sendo empregada na derivação da taxa de formação estelar (SFR) (Kennicutt, 1983; Calzetti, 2013; Madau e Dickinson, 2014), que, por sua vez, podem estar relacionados à massa estelar, morfologia e ao meio em que se encontram as galáxias (Koyama et al., 2013; Speagle et al., 2014; Willett et al., 2015; Boselli et al., 2015; Mármol-Queraltó et al., 2016).

Ainda, a emissão de  $H\alpha$  também pode ser proveniente da atividade nuclear em galáxias ativas (AGN, do inglês *active galactic nucleus*) (Sulentic et al., 1998, 2000; Stasińska et al., 2006), o que torna importante identificar adequadamente a origem dessa emissão nos estudos extragalácticos. Para tanto, é comum o uso dos chamados diagramas de diagnóstico, tal qual o proposto por Baldwin et al. (1981), em que são utilizadas, entre outras, as razões de linhas entre [OIII] e  $H\beta$  e entre [NII] e  $H\alpha$ . O diagrama BPT, como é conhecido, permite classificar os objetos em galáxias ativas, galáxias *star-forming* e galáxias cuja emissão em  $H\alpha$  é oriunda tanto de atividade estelar quanto nuclear, dependendo de qual posição ocupa o objeto no diagrama (Kewley et al., 2001; Kauffmann et al., 2003; Schawinski et al., 2007). A figura 1.7, obtida de Trouille et al. (2011), mostra o diagrama BPT para quase 250000 objetos em que é possível identificar os três tipos de galáxias mencionadas. Dentro dos objetos classificados como AGN ainda é possível separá-los em dois tipos, segundo a intensidade da taxa de ionização. Heckman (1980) foi o primeiro a propor a separação dos AGNs em *LINERs* (Low-Ionization Nuclear Emission-Line Region) e *Seyferts*, onde o primeiro exhibe ionização mais baixa do que o segundo. Schawinski et al. (2007) propuseram uma linha de separação para LINERs e Seyferts, a qual utilizamos em nosso estudo.

É importante pontuar que há ainda contribuição para a emissão em  $H\alpha$  oriunda de estrelas evoluídas, como sugerem os estudos de evolução estelar (Lee e Hyung, 2000; Arrieta e Torres-Peimbert, 2003) e os estudos sobre linhas de emissão em galáxias *early-type* (Binette et al., 1994; Devereux et al., 1995; Stasińska et al., 2008, 2015). Há inclusive trabalhos que defendem que os objetos classificados como LINERs são, na verdade, oriundos da atividade de estrelas em estágio avançado de evolução, como estrelas anãs brancas e pós-AGB (Trinchieri e di Serego Alighieri, 1991; Binette et al., 1994; Stasińska et al., 2008; Cid Fernandes et al., 2010; Belfiore et al., 2016).

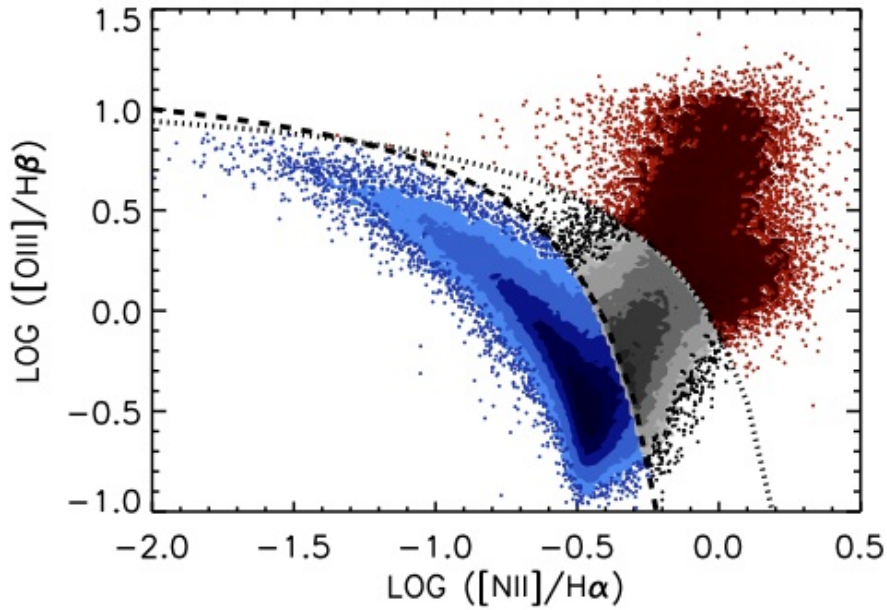


Figura 1.7: Diagrama diagnóstico BPT para quase 250000 galáxias do SDSS/DR8: em azul estão os objetos classificados como galáxias *star-forming*. em vermelho estão as galáxias ativas e em cinza os objetos cujas linhas de emissão são provenientes tanto de atividade estelar quanto atividade nuclear. Figura extraída de Trouille et al. (2011).

Além do uso do  $H\alpha$  para a determinação das taxas de formação estelar, essa linha de emissão é também bastante utilizada para estimar a taxa de extinção nebular nas galáxias, através da razão  $H\alpha/H\beta$  (Mathis, 1983; Osterbrock, 1989; Groves et al., 2012). Partindo-se do pressuposto que a razão entre a intensidade de duas linhas da série de Balmer é intrinsecamente constante, qualquer valor maior dessa constante indicaria a presença de efeitos de avermelhamento. A razão entre as intensidades intrínsecas de  $H\alpha$  e  $H\beta$ , dado o caso B de recombinação <sup>1</sup>, é dada por

$$\frac{I(H\alpha)}{I(H\beta)} = 2.86,$$

sendo comum encontrar valores superiores para essa razão em objetos astronômicos, uma vez que a extinção nebular afeta mais os comprimentos de onda azuis ( $H\beta$ ) do que os comprimentos de onda vermelho ( $H\alpha$ ).

Estudar os objetos sob a perspectiva da emissão em  $H\alpha$  pode ainda nos ajudar a entender as estruturas desses objetos. Uma série de estudos, usando tanto espectroscopia quanto

<sup>1</sup> Caso onde os elétrons com energia maior do que 13.6eV não são reabsorvidos, e onde assumimos uma temperatura de 10000K e densidade eletrônica de  $10^{-2}cm^{-2}$  (Osterbrock, 1989).

imageamento, foram capazes de trazer informações valiosas sobre a variedade de estruturas e formas com que os gases ionizados estão distribuídos em galáxias *early-types*, evidenciando que, mesmo estes objetos sendo carentes de gás para formar estrelas, a emissão em  $H\alpha$  poderia não estar confinada somente à sua região central (Martel et al., 2004; Sarzi et al., 2006; Annibali et al., 2010). O trabalho de Gomes et al. (2016) estudou a emissão em  $H\alpha$  e a taxa de formação estelar para três galáxias do tipo *early-type*, mostrando que tais objetos possuem formação estelar recente em regiões tipo braços, indicando que objetos considerados passivos podem não ter sua formação estelar completamente exaurida.

Além disso, estudos que tentam rastrear como essa emissão está distribuída em galáxias ativas, com formação estelar vigente, têm mostrado resultados interessantes quanto aos processos que podem desencadear formação estelar (Kennicutt, 1983; Kennicutt e Kent, 1983; Tresse e Maddox, 1998; James et al., 2004; Gavazzi et al., 2006), além de mostrar como a distribuição dessa emissão está intimamente ligada também às formas e estruturas que são vistas em outros comprimentos de onda (Zurita et al., 2002; Luisi et al., 2016).

Ainda, a emissão  $H\alpha$ , e a taxa de formação estelar derivada dela, podem ser utilizadas para estudar e caracterizar um tipo de galáxia muito interessante, chamada de *green valley galaxy*. As galáxias *green valley* são objetos que residem em uma região específica do diagrama cor-magnitude, entre a *blue sequence* (com intensa formação estelar) e *red sequence* (com formação estelar suprimida) (Martin et al., 2007; Salim et al., 2007; Wyder et al., 2007; Kauffmann et al., 2003). Belfiore et al. (2017), por exemplo, utilizaram uma amostra de galáxias do MaNGA para mostrar que cerca de 40% das galáxias *green valley* possuem regiões centrais quiescentes (sem formação estelar), enquanto apresentam formação estelar ao longo das regiões mais externas.

### 1.3 Os Novos Surveys

A astronomia moderna se utiliza de imageamentos e espectroscopias dos astros para estudar e entender o Universo. Desde o advento das placas fotográficas até os dispositivos CCD's, a astronomia tem sido responsável pelo desenvolvimento de diversas tecnologias de ponta, sempre na tentativa de resolver melhor novos e velhos questionamentos científicos. Tanto o imageamento quanto o espectro integrado dos objetos observados sempre foram ferramentas indispensáveis na determinação das propriedades dos objetos astronômicos,

sempre vinculando, diagnosticando e testando previsões e modelos. Nos tempos atuais, a existência de diversos *surveys* do céu possibilitaram a geração de um volume de dados absurdamente grande (Mickaelian, 2016), tanto em qualidade quanto em quantidade e variedade, forçando os astrônomos a desenvolver novas técnicas de aquisição, análise e manipulação de dados.

Diante desse novo paradigma da informação, vários projetos foram ou estão sendo desenvolvidos com o objetivo de conhecer mais e melhor nosso universo, através de duas importantes frentes: a espectroscopia de campo integral e o imageamento em multi-bandas. No caso do mapeamento do céu com o uso de espectroscopia de campo integral, podemos destacar os projetos Atlas3D Cappellari et al. (2011), SAMI (*Sydney-AAO Multi-object IFS*, Croom et al. (2012)), CALIFA Survey (*Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area Survey*, Sánchez et al. (2012)) e MaNGA (*Mapping Nearby Galaxies at APO*, Bundy et al. (2015)) que estão trazendo a possibilidade de estudar as galáxias de uma maneira mais ampla através de estudos espacialmente resolvidos das principais propriedades e linhas de emissão observadas. As principais diferenças entre esses projetos, em termos de *field of view* e cobertura espectral, estão resumida na figura 1.8. Nessa figura, temos i) a imagem RGB de uma galáxia observada pelo SDSS e como ela seria vista em cada um dos mencionados *surveys* e ii) a cobertura espectral de cada projeto, onde a cor utilizada faz referência a cor utilizada no nome do projeto. Uma vez que cada projeto tem campos de visão e coberturas espectrais bastante específicas, os estudos possibilitados por eles também são bastante variados.

Já dentre os projetos de imageamento em multi-bandas (ou multi-filtros), podemos citar os projetos ALHAMBRA (*Advanced Large Homogeneous Area Medium-Band Redshift Astronomical*, Moles et al. (2008) ) com 20 filtros, o J-PAS (*Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey*, Benitez et al. (2014)) com 56 filtros estreitos e 3 filtros largos, e os projetos J-PLUS (*Javalambre-Photometric Local Universe Survey*, Cenarro et al. (2018)) e S-PLUS (*Southern Photometric Local Universe Survey*, (Mendes de Oliveira et al., in prep.) ambos com 12 filtros. Os imageamento multi-banda é uma ferramenta bastante interessante, uma vez que viabiliza a geração de SED's (*Spectral energy distribution*) de baixa resolução, uma espécie de espectroscopia de campo integral de baixa resolução, com a vantagem de ser menos custosa do que a espectroscopia, possibilitando observar mais objetos do que os projetos de espectroscopia de campo integral. Inclusive,



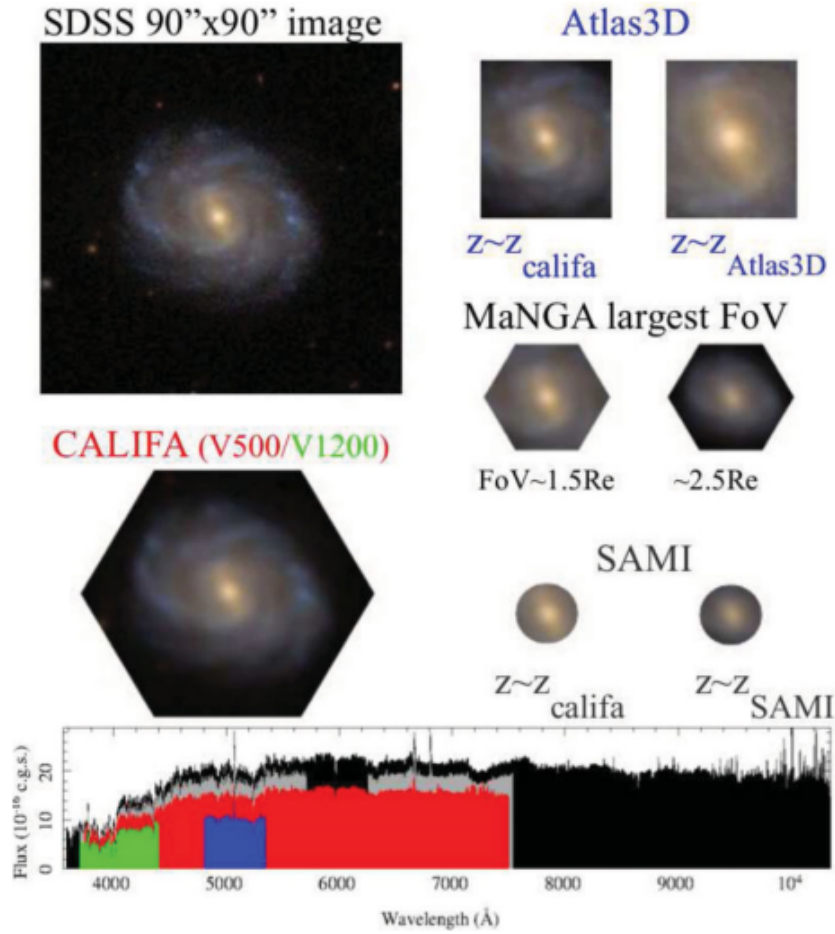


Figura 1.8: Principais diferenças, em termos de campo de visão e cobertura espectral, dos *surveys* CALIFA, Atlas3D, MaNGA e SAMI. As cores utilizadas nos nomes dos projetos são as mesmas utilizadas na cobertura espectral, onde nota-se que os projetos CALIFA e MaNGA são os com maiores coberturas. Figura extraída de Sánchez (2015).

os projetos J-PAS, J-PLUS e S-PLUS poderão ser utilizados para obtenção de imagens em  $H\alpha$  (Vilella-Rojo et al., 2015; Logroño-García et al., 2018).

### 1.3.1 Espectroscopia de Campo Integral

Durante muito tempo, as observações feitas em astronomia podiam ser divididas em 2 tipos: observações fotométricas e observações espectroscópicas. Com a evolução da instrumentação astronômica, a espectroscopia e a fotometria caminharam juntas para o que chamamos hoje de espectroscopia de campo integral (IFS, do inglês *Integral Field Spectroscopy*), uma técnica observacional que fornece informações em 3 dimensões (2 dimensões espaciais e 1 dimensão espectral). Um cubo de dados de um objeto, que é o produto do IFS, pode ser entendido tanto como o conjunto de imagens do objeto em todos os comprimentos de onda.

mentos de onda quanto um conjunto de espectros para cada píxel do objeto observado. A figura 1.9, retirada de Harrison (2014), mostra um esquema simplificado de um cubo de dados, com as dimensões espaciais ( $x, y$ ) e espectroscópicas ( $\lambda$ ) do cubo.

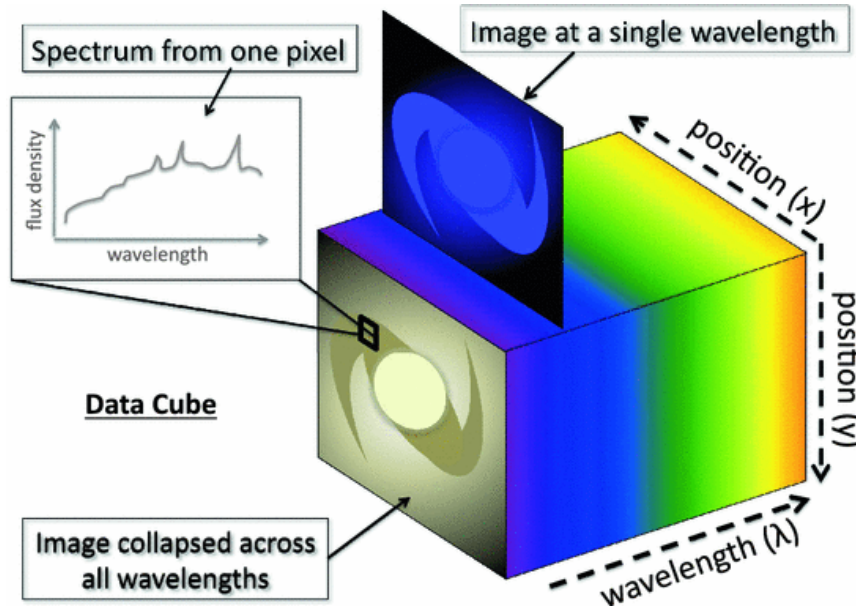


Figura 1.9: Representação de um cubo de dados, com duas dimensões espaciais ( $x, y$ ) e uma espectral ( $\lambda$ ). Um cubo de dados permite a obtenção de i) imagens do objeto em vários comprimentos de onda e ii) espectros para cada píxel da imagem. Figura extraída de Harrison (2014).

Embora a espectroscopia 3D tenha sido usada em diversos estudos em astronomia, até meados dos anos 2000 a maior parte das observações se restringiam apenas a pequenas regiões dos objetos (regiões centrais de galáxias, aglomerados estelares, nebulosas) ou a amostras bastante pequenas (veja exemplos em Emsellem et al. (1999); García-Lorenzo et al. (2005); Tsamis et al. (2007); Rosales-Ortega et al. (2011); De Caprio et al. (2012); Ricci et al. (2014); Ali et al. (2016)). Somente nos últimos anos que projetos, como os mencionados em 1.3, foram criados e possibilitaram a exploração das galáxias sob outros vieses.

O uso de observações com IFU abre novas possibilidades de estudo, uma vez que tal técnica permite, por exemplo a criação de estudos espacialmente resolvidos de populações estelares, cinemática de gases, estruturas e mapas de linhas de emissão.

## 1.4 Motivação do trabalho

Dado o panorama exposto acerca dos estudos sobre a natureza das galáxias (seção 1.1) e sobre a possibilidade de novas abordagens aos problemas astrofísicos ofertados pelos novos *surveys* (seção 1.3.1), o presente trabalho apresenta uma proposta de metodologia para o estudo da emissão em  $H\alpha$  nas galáxias através da análise e classificação dos perfis dessa emissão. As técnicas e análises aqui discutidas trazem um novo olhar sobre a distribuição da emissão em  $H\alpha$ , que poderá ser adaptada e utilizada em dados oriundos dos novos *surveys*.

No capítulo 2 será apresentado o *survey* CALIFA, a rotina Pipe3D que gerou os diversos *dataproducs* do CALIFA e, por fim, a amostra final selecionada para este trabalho. O capítulo 3 apresenta os estimadores estatísticos e geométricos utilizados na análise. Já o capítulo 4 apresenta a classificação dos perfis de  $H\alpha$ , utilizando os estimadores definidos para esse trabalho, além de apresentar a correlação dos perfis com diversos parâmetros físicos. As principais conclusões são apresentadas no capítulo 5, as perspectivas de aplicação do método são abordadas no capítulo 6 e, por fim, no apêndice A estão os mapas e perfis de  $H\alpha$  de toda a amostra de galáxias utilizada.



# Base de dados

No presente capítulo, descrevemos o *survey CALIFA*, do qual obtivemos nossa amostra de dados, bem como apresentamos o detalhamento dos critérios utilizados para a seleção final de galáxias utilizada neste trabalho.

### 2.1 O Levantamento CALIFA

O *survey CALIFA* (*The Calar Alto Legacy Integral Field Area survey*), realizado pelo Centro Astronômico Hispano-Germânico no observatório Calar Alto, é atualmente um dos mais importantes levantamentos do céu com espectroscopia do tipo IFS (Sánchez et al., 2012), e que, a partir de uma amostra base com cerca de 930 galáxias (Walcher et al., 2014), tem fornecido informações em 3D (2D espacial + 1D espectral) para mais de 600 objetos, selecionados de modo a permitir que o diagrama cor-magnitude de suas galáxias seja satisfatoriamente coberto (figura 2.1, extraída do DR3 do CALIFA Sánchez et al. (2016)).

Com o espectrógrafo PMAS (Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer, (Roth et al., 2005)) e um campo de visão de  $74'' \times 64''$ , foram observadas galáxias no universo local ( $0,005 < z < 0,03$ ), com uma cobertura espectral de  $3500\text{\AA}$  até  $7000\text{\AA}$  divididos em duas resoluções espectrais. Na primeira configuração, V500, as observações se estenderam de  $3700\text{\AA}$  a  $7000\text{\AA}$  com uma resolução espectral  $R = \Delta\lambda/\lambda = 850$ , sendo adequadas para estudos de populações estelares e medidas das linhas de emissão de gases ionizados, desde linhas do  $[\text{OII}]\lambda 3727$  até  $[\text{SII}]\lambda 6731$ . Já na segunda configuração, V1200, os objetos foram observados com maior resolução,  $R \sim 1650$ , na região azul do espectro, se estendendo de  $3700\text{\AA}$  até  $5000\text{\AA}$ . Os dados observados na configuração V1200 possibilitam análises mais

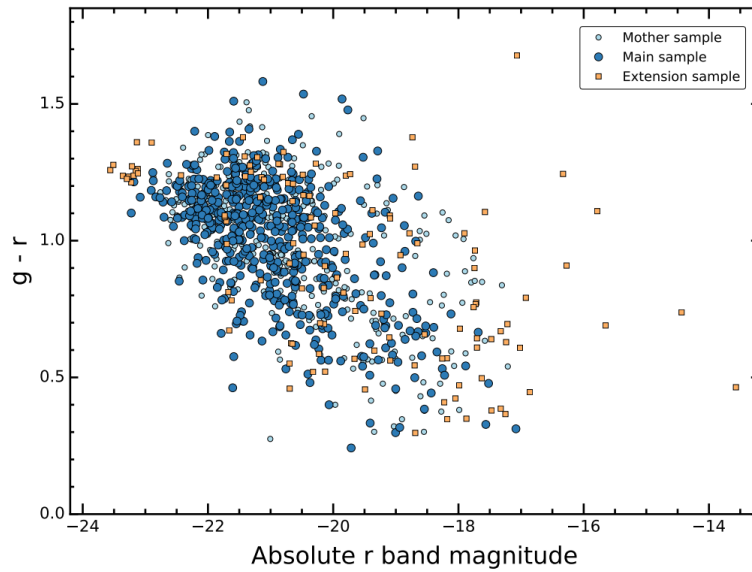


Figura 2.1: Diagrama cor-magnitude (CMD) das galáxias da amostra base (em azul claro) e da amostra principal do DR3 (em azul escuro). Os pontos em amarelo correspondem às galáxias da amostra estendida, que compreende os tipos de galáxias mais raras ou incomuns da amostra principal. A amostra utilizada no presente trabalho foi derivada do DR2, que por sua vez está contida no DR3. Figura retirada de Sánchez et al. (2016).

detalhadas das populações estelares, bem como da cinemática do gás e das estrelas. A figura 2.2 mostra a cobertura espectral do *survey* e as regiões do espectro observadas em cada modo, V500 e V1200.

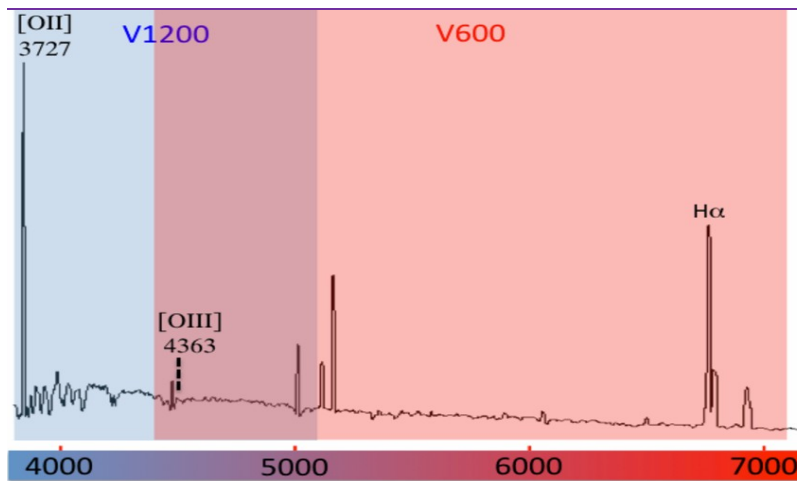


Figura 2.2: Cobertura espectral do CALIFA Survey: a região azul, vermelha e a região de sobreposição das duas bandas. Figura extraída de Marino et al. (2012)

Os dados fornecidos pelo CALIFA estão possibilitando estudos e análises em diversos

campos, tais como sobre AGN's, formação estelar, fontes de ionização, gradientes de metalicidade e idade de populações estelares, dentre outras importantes áreas da astrofísica moderna (alguns exemplos podem ser vistos em Singh et al., 2013; Sánchez et al., 2013; Sánchez-Blázquez et al., 2014; González Delgado et al., 2014; Sánchez-Menguiano et al., 2016).

## 2.2 Pipe3D - Dataproducts do CALIFA

Além dos espectros de campo integral, o CALIFA também foi projetado para oferecer diversos *dataproducts*<sup>1</sup> com mapas de diversas propriedades das galáxias observadas. Dentre os diferentes mapas, estão os de idade estelar média ponderada pela luminosidade, metalicidade média, massa estelar e os mapas de fluxos de várias linhas de emissão, que são de interesse do presente trabalho.

Para a redução dos cubos de dados e produção dos *dataproducts*, foi empregada a rotina PIPE3D (Sánchez et al., 2016), uma *pipeline* desenhada para processar e analisar os dados do tipo IFU tanto do CALIFA quanto de outros *surveys*. As etapas de redução e processamento utilizadas no PIPE3D são brevemente expostas a seguir.

- i - Pré-processamento do cubo de dados: Essa etapa consiste em reduzir os cubos de dados, fazer a correção da extinção galáctica<sup>2</sup> e converter todos os cubos em unidade de  $10^{-16} \text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1} \text{spaxel}^{-1}$ .<sup>3</sup> Só então é realizada a remoção de estrelas que estão à frente das galáxias, dentro do FoV, e de regiões com S/N muito baixo ( $< 3$ ).
- ii - Análise do espectro central: Após o pré-processamento, a pipeline extrai um espectro central (com um diâmetro de 5") centrado no pico de emissão da imagem da galáxia na banda V e B, nos casos de V500 e V1200, respectivamente. Em cada espectro central, ajustam-se populações estelares simples (SSP, do inglês *simple stellar population*) e, com isso, derivam-se diversos parâmetros associados às populações estelares e a forma do contínuo do espectro.

---

<sup>1</sup> *Dataproducts* é o termo utilizado pela Colaboração CALIFA para designar todos os produtos derivados da análise dos cubos de dados.

<sup>2</sup> Extinção corrigida utilizando a lei de extinção da Via Láctea dada por Cardelli et al. (1989) e uma atenuação de poeira de  $R_v = 3,1$

<sup>3</sup> O termo *spaxel* é definido como sendo um ponto (píxel) da imagem que contém o espectro daquele ponto. Spaxel deriva de *Space Pixels* (Hörtner et al., 2012).

iii - Binagem espacial: Na etapa anterior, o espectro central tem excelente S/N, tornando as estimativas de propriedades das populações estelares bastante confiáveis. Entretanto, conforme a análise se estende para as regiões mais externas da galáxia, o S/N por píxel diminui consideravelmente, de modo que a confiabilidade dos parâmetros derivados para essas regiões também diminui. Para contornar esse problema, adota-se a binagem dos spaxels do cubo de dados, a fim de garantir um valor mínimo de S/N e, conseqüentemente, maior significância nos resultados obtidos nas regiões periféricas.

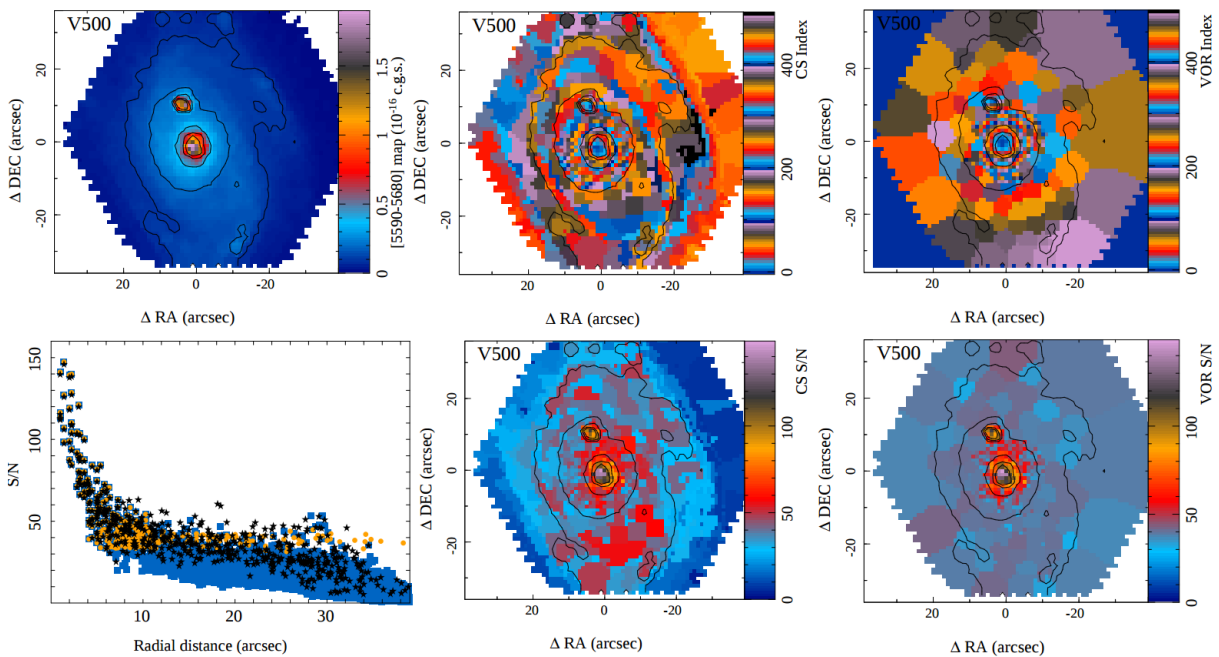


Figura 2.3: Comparação entre as binagens feitas com o método *CS-binning* utilizado pelo Pipe3D e com tesselação de Voronoi. As duas imagens à direita, em ambos os painéis, exibem os resultados para o *CS-binning* e Voronoi, respectivamente, com o mapa de segmentação exibido acima e o mapa de S/N segmentado abaixo. Figura retirada de Sánchez et al. (2016), em que os mapas foram produzidos pela soma dos fluxos dentro do intervalo de 5590Å–5680Å.

A binagem utilizada pelo Pipe3D deriva da tesselação de Voronoi, chamada de *CS-binning*, que além de estipular como critério um valor de S/N mínimo também impõe que a distribuição do brilho superficial seja contínua. A figura 2.3, retirada de Sánchez et al. (2016), mostra uma comparação entre as binagens feitas com o método *CS-binning* e com tesselação de Voronoi.

Nota-se que o resultado de binagem adotada pela pipeline do Pipe3D é muito similar ao resultado da tesselação de Voronoi nas regiões centrais, onde o S/N geralmente é



maior do que o valor limite escolhido. Entretanto, nas regiões externas, o *CS-binning* atinge o valor limite de S/N através de bins menores do que aqueles obtidos por Voronoi, gerando mapas mais consistentes com a imagem não binada, uma vez que os bins dessas regiões de baixo S/N por píxel são mais homogêneos. Essa abordagem é mais interessante pois tende a manter a forma original das imagens, não aplainando as estruturas presentes nas regiões mais externas das galáxias. O mesmo pode ser dito sobre o mapa de S/N resultante da binagem, como mostrado nos painéis inferiores da figura 2.3. O limite imposto pela rotina do Pipe3D foi de  $S/N > 50$ .

- iv - Análise das populações estelares: Após a binagem do cubo de dados, são ajustados espectros de SSP's a cada espectro associado a um dado bin espacial, utilizando os mesmos métodos empregados no passo [ii]. É nessa etapa que são determinadas as principais propriedades das populações estelares em cada píxel/spaxel e seus respectivos espectros de linha de emissão. As propriedades das populações estelares determinadas nessa etapa são as idades e metalicidades ponderadas pela luminosidade, idades e metalicidades ponderadas pela massa, a razão massa-luminosidade média, o histórico de formação estelar e a densidade superficial de massa (Sánchez et al., 2016). Além das propriedades de populações estelares, também são derivados os valores de velocidade sistêmica, dispersão de velocidades e atenuação de poeira. Então, com o ajuste e subtração do espectro advindo das populações estelares simples, as propriedades das linhas de emissão podem ser obtidas a partir de ajustes no espectro residual. As linhas de emissão fortes ajustadas são [OII] $\lambda$ 3727, H $\delta$ , H $\gamma$ , H $\beta$ , [OIII] $\lambda$ 4959, [OIII] $\lambda$ 5007, [NII] $\lambda$ 6548, [NII] $\lambda$ 6583, H $\alpha$ , [SII] $\lambda$ 6717 e [SII] $\lambda$ 6731.
- v - Dezonificação: A dezonificação é um processo proposto por Cid Fernandes et al. (2014) que faz o contrário do procedimento de binagem, isto é, fornece uma distribuição espacial píxel a píxel das propriedades que antes foram derivadas para cada bin espacial.
- vi - Análise das linhas de emissão fortes: A análise das linhas de emissão fortes é necessária para que seja possível derivar as propriedades do gás ionizado com a melhor resolução espacial possível. As linhas de emissão mencionadas na etapa [iv] são ajustadas com uma função gaussiana gerando os fluxos de cada linha de emissão<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Os fluxos derivados desse ajuste não estão ainda corrigidos pela extinção interna à galáxia.

- vii - Análise das linhas de emissão fracas: Além das linhas de emissão fortes, é necessário também ajustar o espectro das linhas de emissão fracas, uma vez que essas linhas são muito mais frequentes do que as fortes. Uma vez que é computacionalmente custoso realizar ajustes gaussianos nas muitas linhas de emissão fracas, utilizou-se uma estimativa direta das propriedades dessas linhas. Dado que utilizamos apenas as linhas de emissão fortes em nosso trabalho, o detalhamento do processo de ajuste das linhas fracas não será feito, sendo possível ser consultado no artigo do Pipe3D.
- viii - Empacotamento dos *dataproducs*: Após todas as etapas mencionadas acima, os produtos gerados são empacotados em arquivos do tipo FITS, com mapas contendo os valores e erros dos diversos parâmetros derivados na análise do cubo de dados. Todos os mapas possuem a mesma forma original do cubo de dados e mesmo sistema de coordenadas WCS<sup>5</sup>. Diversos *dataproducs* são gerados pela rotina Pipe3D, sendo utilizados em nosso trabalho os cubos com mapas descrevendo as propriedades das linhas de emissão fortes.

## 2.3 Nossa amostra

A amostra final utilizada em nosso estudo derivou dos dados de 200 objetos do DR2 do CALIFA, que corresponde à segunda distribuição de dados feita pelo *survey*, e que foram analisados com a rotina Pipe3D descrita acima. Desse total, foram selecionadas apenas as galáxias cuja elipticidade <sup>6</sup>  $\epsilon$  na banda V fosse inferior à 0.35, resultando num total de 86 objetos.

### 2.3.1 Correção da extinção nebular

Na determinação das propriedades das linhas de emissão fortes, a *pipeline* Pipe3D não corrige a extinção nas linhas, de tal modo que foi necessário a realização dessa correção antes de prosseguir com nossos estudos. Assumindo um modelo de *dust screen*, o fluxo corrigido de uma dada linha é dado por

<sup>5</sup> WCS (World Coordinate System) é um sistema de coordenadas que descreve coordenadas físicas associadas a uma imagem, tais como ascensão reta (RA) e declinação (DEC).

<sup>6</sup> A elipticidade foi calculada a partir dos momentos invariantes de 2<sup>a</sup> ordem, conforme descrito no item 3.1.1.

$$F(\lambda)_{int} = F(\lambda)_{obs} \times 10^{0.4A_\lambda}$$

onde  $F(\lambda)_{int}$  é o fluxo intrínseco que seria observado na ausência da atenuação,  $F(\lambda)_{obs}$  é o fluxo de fato observado e  $A_\lambda$  é o avermelhamento no comprimento de onda  $\lambda$ , que obtivemos a partir da lei de extinção de Cardelli et al. (1989)

$$\frac{A_\lambda}{A_V} = a(x) + \frac{b(x)}{R_V}$$

onde  $x = \frac{1}{\lambda}$  e  $R_V = 3.1$ . As expressões para  $a(x)$  e  $b(x)$  para o caso óptico estão apresentadas em Cardelli et al. (1989). Para encontrarmos o valor de  $A_V$  utilizamos a razão entre as linhas de H $\alpha$  e H $\beta$ :

$$A_V = 3.1 \frac{1}{\kappa(H\beta) - \kappa(H\alpha)} \log\left[\frac{(H\alpha/H\beta)_{obs}}{(H\alpha/H\beta)_{int}}\right].$$

A razão intrínseca entre H $\alpha$  e H $\beta$ ,  $(H\alpha/H\beta)_{int}$ , para o caso B de recombinação<sup>7</sup> é dado por  $(H\alpha/H\beta)_{int}=2.86$ , de onde se obtém então o avermelhamento  $A_V$ :

$$A_V = \frac{3.1}{\kappa(H\beta) - \kappa(H\alpha)} \log\left[\frac{(H\alpha/H\beta)}{2.86}\right].$$

Assim, utilizando a curva de atenuação proposto em Calzetti et al. (1994), a diferença entre  $\kappa(H\beta)$  e  $\kappa(H\alpha)$  é

$$\kappa(H\beta) - \kappa(H\alpha) = 1.27$$

resultando na seguinte expressão para o avermelhamento nebuloso em função de H $\alpha$  e H $\beta$ :

$$A_V = 6.10 \log\left[\frac{H\alpha}{H\beta}\right] - 2.78$$

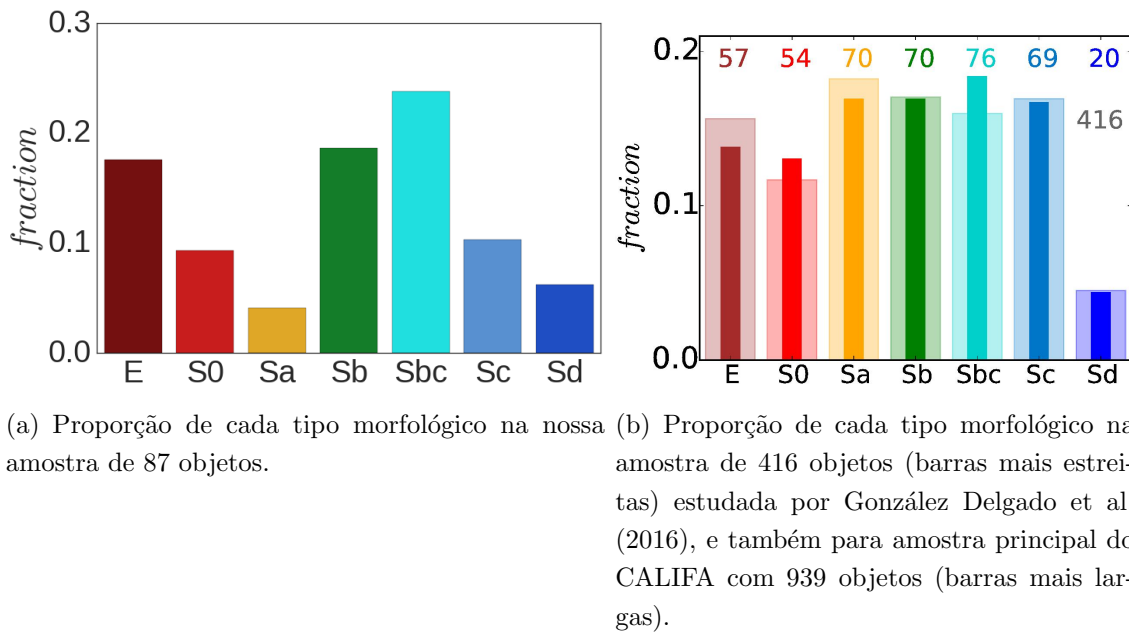
Utilizamos essas expressões para calcular o valor do avermelhamento nas linhas, píxel a píxel. Entretanto, para o desvermelhamento do contínuo dos mapas, utilizou-se o valor médio de  $A_V$  da galáxia, calculado excluindo-se a região central ( $raio > 0.2R_{total}$ <sup>8</sup>), a fim de evitar contaminação da emissão em H $\alpha$  oriunda de outras fontes que não puramente estelares.

<sup>7</sup> Caso onde os elétrons com energia maior do que 13.6eV não são reabsorvidos, tendo uma temperatura de 10000K e densidade eletrônica de  $10^2 cm^2$  (Osterbrock, 1989).

<sup>8</sup> Raio total, na verdade, é o semi-eixo maior  $a$ , medido via momentos invariantes, ver seção 3.1.1.

### 2.3.2 Classes Morfológicas

A classificação morfológica proposta inicialmente por Hubble (Hubble, 1936a) é ainda bastante utilizada na classificação visual das galáxias, dado que diversos estudos mostram que tal classificação possui correlações com diversas propriedades das galáxias (Kauffmann et al., 2003; Casado et al., 2015; González Delgado et al., 2016). A classificação morfológica utilizada pela colaboração CALIFA segue então a classificação de Hubble, com as galáxias sendo classificadas como elípticas E (com todos os subtipos de elíptica inclusos), lenticulares S0, espirais de Sa a Sd, e as irregulares Sm e Ir. Na figura 2.4 está exibida a proporção de cada tipo morfológico para (a) a amostra utilizada em nosso estudo e (b) para a amostra de 416 galáxias utilizada em González Delgado et al. (2016). A amostra principal do CALIFA possui uma distribuição bastante uniforme em todos os tipos morfológicos, ao passo que nossa amostra exibe uma distribuição morfológica com excesso relativo de elípticas e Sbc.



(a) Proporção de cada tipo morfológico na nossa amostra de 87 objetos.

(b) Proporção de cada tipo morfológico na amostra de 416 objetos (barras mais estreitas) estudada por González Delgado et al. (2016), e também para amostra principal do CALIFA com 939 objetos (barras mais largas).

Figura 2.4: Proporção de tipos morfológicos na (a) amostra utilizada no presente trabalho e (b) na amostra principal do CALIFA e no trabalho realizado por González Delgado et al. (2016).

Ainda que a classificação de Hubble seja amplamente utilizada, a fim de facilitar as análises realizadas, reduzimos a amostra final em três classes morfológicas: elípticas e S0's, espirais precoces e espirais tardias. Ao contrário da distribuição mostrada na figura 2.4, a separação em três classes morfológicas fez com que a amostra analisada tivesse uma distribuição de tipos mais homogênea. A tabela 2.1 apresenta as classes morfológicas e

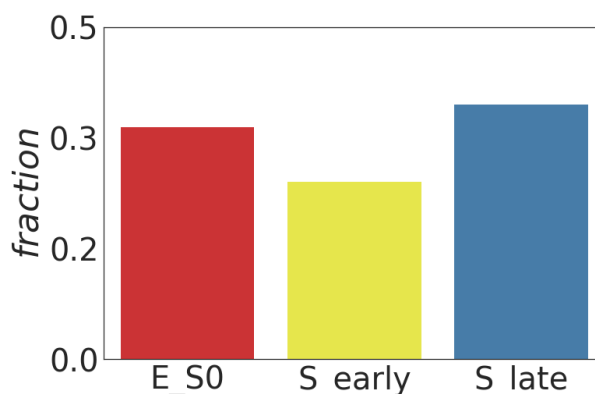


Figura 2.5: Proporção de classes morfológicas (elípticas e lenticulares, espirais precoces e espirais tardias) na amostra estudada.

os correspondentes tipos de Hubble, bem como a quantidade de cada de objetos em cada classe; já a figura 2.5 reproduz a distribuição das respectivas classes.

Tabela 2.1 - Classificação das galáxias em classes morfológicas E\_S0, S\_late, S\_early.

Classe Morfológica	Hubble type	#
E_S0	E0-E7 e S0	30
S_early	Sa, Sab, Sb	23
S_late	Sbc, Sc, Scd, Sd	33

Salvo menção em contrário, todas as análises feitas com relação à morfologia foram realizadas considerando os três tipos de classes morfológicas determinados acima.

### 2.3.3 Caracterização da amostra

A amostra final com as 86 galáxias possui cores u-r entre 1.4 e 3.4, idades médias (ponderadas em luminosidade) entre  $\sim 10^{7.8}$  e  $10^{9.8}$  anos, massas estelares totais variando entre  $\sim 10^{9.5}M_*/M_\odot$  e  $10^{11.8}M_*/M_\odot$  e metalicidades  $\log(Z)$  entre -0.4 e -0.03. A figura 2.6 exibe a distribuição das respectivas grandezas, enquanto na tabela 2.2 se encontram as galáxias da amostra e suas principais características físicas (nome, magnitude absoluta em r, cor u-r, idade média, metalicidade média, massa estelar total, morfologia e classe morfológica). Ainda na tabela 2.2, a última coluna indica se a galáxia possui barra (B), não possui barra (A) ou é indefinido (AB). A figura 2.8 exibe um mosaico com as imagens

RGB das galáxias da amostra.

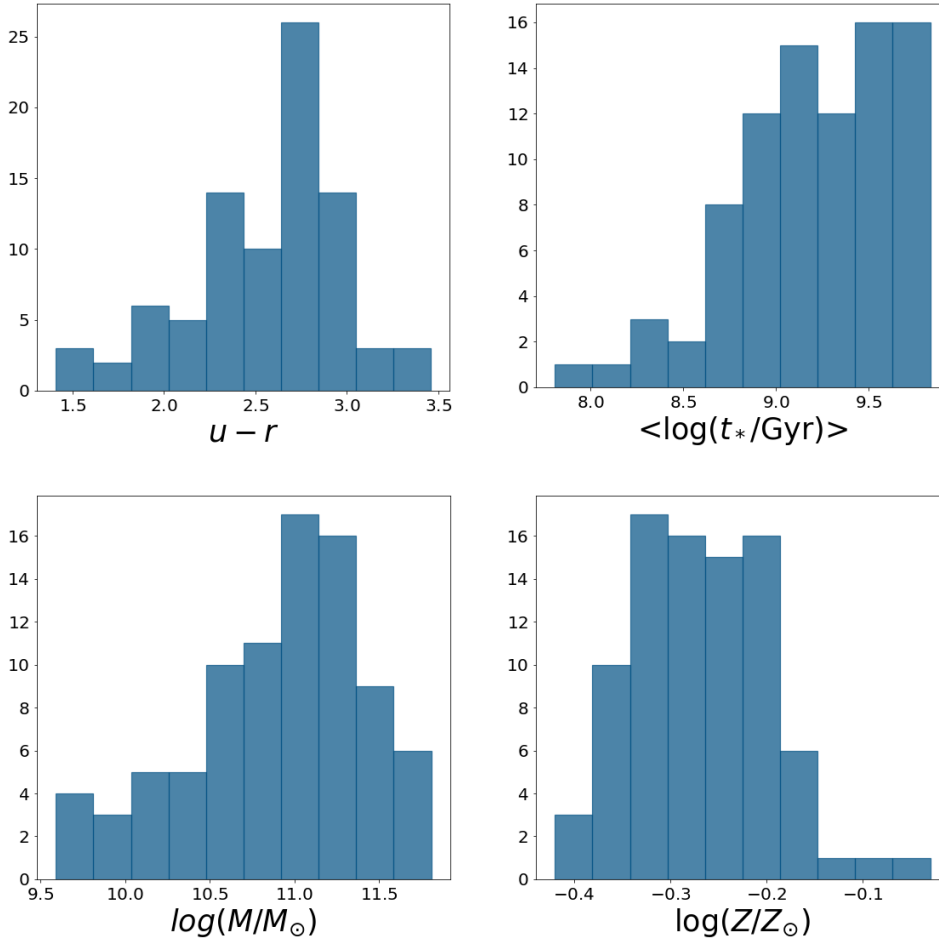


Figura 2.6: A amostra final de galáxias com cor  $u-r$  entre 1.4 e 3.6, idades entre  $10^{7.8}$  e  $10^{9.8}$  anos, massas estelares entre  $10^{9.5} M_*/M_\odot$  e  $10^{11.8} M_*/M_\odot$  e metalicidade  $\log(Z)$  entre -0.4 e -0.09. A curva azul denota a função de densidade de probabilidade da variável em questão.

Quanto ao tipo de fonte da emissão em  $H\alpha$ , a figura 2.7 mostra o diagrama diagnóstico de Baldwin-Phillips-Terlevich (BPT, Baldwin et al. (1981)) para todas as galáxias da amostra final, onde utilizou-se os valores médios de  $\log([OIII]\lambda 5007/H\beta)$  e  $\log([NII]\lambda 6583/H\alpha)$ . Nesse diagrama estão as linhas de demarcação propostas por Kauffmann et al. (2003) para emissão puramente estelar e Kewley et al. (2001) para emissão não-térmica, onde nota-se que as galáxias da amostra estão bem divididas entre a região dominada por objetos cujas linhas de emissão são advindas de atividade estelar e a região intermediária, onde as linhas de emissão são tanto de origem estelar quanto não-térmica (advinda de um agn). A linha de demarcação proposta por Schawinski et al. (2007) separa os objetos com linhas de emissão advindas da atividade nuclear em objetos tipo Seyfert (acima) e tipo LINERS (abaixo),

sugerindo que os objetos de nossa amostra que estão na região de transição provavelmente são objetos do tipo LINER.

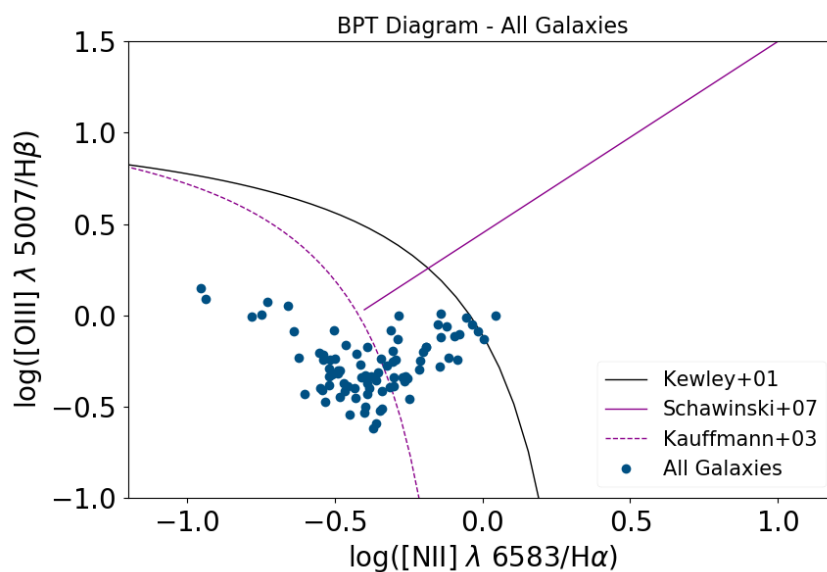


Figura 2.7: Diagrama diagnóstico BPT para os valores médios das emissões nas galáxias da amostra final.

Tabela 2.2 - Galáxias da amostra e suas propriedades: magnitude absoluta em r, cor u-r, idade média ( $\log(\text{age}/\text{yr})$ ), metalicidade ( $[Z/H]$ ), Massa estelar integrada ( $\log(M/M_{\odot})$ ), morfologia e a classe morfológica. A última coluna, Barra, indica se a galáxia possui barra (B), não possui barra (A) ou é indefinida (AB).

Nome	Mr	u-r	Idade média	Metalicidade	Massa estelar	Morfologia	Classe Morf.	Barra
UGC00005	-21.76	2.76	8.97	-0.31	11.16	Sbc	S_late	A
NGC7819	-20.57	2.30	8.68	-0.29	10.61	Sc	S_late	A
IC1528	-20.41	2.18	8.75	-0.34	10.54	Sbc	S_late	AB
NGC0001	-21.11	2.24	8.89	-0.35	10.82	Sbc	S_late	A
NGC0036	-21.86	2.48	9.30	-0.34	11.22	Sb	S_early	B
UGC00312	-20.23	1.70	8.44	-0.33	10.35	Sd	S_late	B
NGC0171	-21.24	2.59	9.18	-0.21	10.93	Sb	S_early	B
NGC0237	-20.75	1.84	8.79	-0.33	10.59	Sc	S_late	B
NGC0477	-20.79	2.39	8.89	-0.33	10.89	Sbc	S_late	AB
IC1683	-20.75	2.54	9.31	-0.24	10.76	Sb	S_early	AB
NGC0496	-21.12	2.32	8.74	-0.31	10.84	Sc	S_late	A
NGC0774	-21.12	2.65	9.59	-0.20	11.02	S0	E_S0	A
NGC0776	-21.46	2.67	9.26	-0.30	11.08	Sb	S_early	B
NGC1349	-22.15	2.75	9.20	-0.21	11.33	E	E_S0	A
NGC1645	-21.45	2.65	9.11	-0.19	11.03	S0	E_S0	B

Continua na próxima página...

Tabela 2.2 - Continuação

Nome	Mr	u-r	Idade média	Metalicidade	Massa estelar	Morfologia	Classe Morf.	Barra
NGC2253	-21.20	2.37	8.80	-0.36	10.80	Sbc	S_late	B
NGC2347	-21.60	2.15	8.64	-0.33	11.04	Sbc	S_late	AB
NGC2730	-20.40	1.89	7.81	-0.36	10.13	Sc	S_late	B
NGC2880	-20.24	2.65	9.70	-0.25	10.55	E	E_S0	AB
NGC2906	-20.56	2.96	9.42	-0.31	10.58	Sbc	S_late	A
NGC2916	-21.17	2.18	8.94	-0.31	10.96	Sbc	S_late	A
UGC05108	-21.71	2.44	9.14	-0.18	11.10	Sb	S_early	B
UGC05358	-18.58	1.77	8.63	-0.24	9.56	Sd	S_late	B
UGC05771	-21.91	2.72	9.61	-0.24	11.27	E	E_S0	A
NGC3381	-19.32	1.84	8.81	-0.33	9.88	Sd	S_late	B
IC0674	-21.80	2.56	9.09	-0.25	11.14	Sa	S_early	B
NGC3614	-19.96	2.52	9.22	-0.42	10.31	Sbc	S_late	AB
NGC3994	-20.70	1.84	8.97	-0.29	10.59	Sbc	S_late	AB
NGC4003	-21.71	2.68	9.59	-0.15	11.12	S0	E_S0	B
UGC07012	-19.34	1.42	8.41	-0.26	9.90	Sc	S_late	AB
NGC4185	-21.32	3.11	9.41	-0.28	10.85	Sbc	S_late	AB
NGC4210	-20.38	2.51	9.09	-0.32	10.50	Sb	S_early	B
IC0776	-18.69	1.94	8.34	-0.27	9.59	Sd	S_late	A
NGC4470	-20.44	1.50	9.01	-0.38	10.23	Sc	S_late	A
NGC4874	-22.68	2.98	9.83	-0.21	11.66	E	E_S0	A
UGC08234	-22.41	2.35	9.10	-0.17	11.39	S0	E_S0	A
NGC5000	-21.36	2.39	9.08	-0.18	10.94	Sbc	S_late	B
NGC5205	-19.34	2.38	8.99	-0.33	9.98	Sbc	S_late	B
NGC5216	-20.28	2.66	9.56	-0.22	10.58	E	E_S0	A
UGC08733	-18.73	1.63	8.75	-0.27	9.61	Sd	S_late	B
UGC08781	-22.09	2.69	9.29	-0.19	11.27	Sb	S_early	B
NGC5378	-20.60	2.85	9.48	-0.27	10.61	Sb	S_early	B
NGC5406	-22.03	2.81	9.33	-0.29	11.26	Sb	S_early	B
NGC5485	-20.72	2.78	9.78	-0.20	10.74	E	E_S0	A
UGC09067	-21.62	1.79	8.86	-0.24	10.96	Sbc	S_late	AB
NGC5520	-19.50	2.24	8.71	-0.33	10.07	Sbc	S_late	A
NGC5720	-21.90	2.40	9.12	-0.32	11.19	Sbc	S_late	B
UGC09476	-20.35	2.09	9.02	-0.36	10.43	Sbc	S_late	A
NGC5784	-21.96	2.84	9.56	-0.29	11.32	S0	E_S0	A
NGC5888	-22.51	2.82	9.44	-0.22	11.47	Sb	S_early	B
NGC5966	-21.43	2.77	9.70	-0.25	11.12	E	E_S0	A
IC4566	-21.51	2.88	9.30	-0.26	11.01	Sb	S_early	B
NGC6004	-21.14	3.46	9.29	-0.34	10.86	Sbc	S_late	B
NGC6020	-21.29	2.98	9.59	-0.26	11.04	E	E_S0	A
NGC6063	-20.02	2.35	9.04	-0.38	10.36	Sbc	S_late	A
NGC6081	-21.52	2.86	9.53	-0.22	11.03	S0	E_S0	A
NGC6125	-22.01	2.74	9.78	-0.24	11.35	E	E_S0	A
NGC6146	-22.94	2.73	9.59	-0.09	11.71	E	E_S0	A
NGC6154	-21.60	2.73	9.48	-0.28	11.14	Sa	S_early	B

Continua na próxima página...



Tabela 2.2 - Continuação

Nome	Mr	u-r	Idade média	Metalicidade	Massa estelar	Morfologia	Classe Morf.	Barra
NGC6150	-22.28	2.86	9.65	-0.15	11.42	E	E_S0	A
NGC6173	-23.11	2.91	9.81	-0.22	11.81	E	E_S0	A
UGC10693	-22.66	2.94	9.74	-0.28	11.61	E	E_S0	AB
UGC10796	-18.90	1.75	8.54	-0.23	9.77	Sc	S_late	AB
IC1256	-20.81	2.21	9.08	-0.29	10.72	Sb	S_early	AB
UGC10905	-22.32	2.78	9.53	-0.26	11.45	S0	E_S0	A
NGC6515	-22.11	2.73	9.44	-0.26	11.37	E	E_S0	A
NGC6941	-21.87	2.76	9.27	-0.28	11.21	Sb	S_early	B
NGC6978	-21.75	2.66	9.19	-0.24	11.13	Sb	S_early	AB
UGC11649	-20.60	2.88	9.22	-0.22	10.75	Sa	S_early	B
NGC7194	-22.35	2.79	9.67	-0.13	11.56	E	E_S0	A
NGC7311	-22.02	2.59	9.22	-0.33	11.28	Sa	S_early	A
NGC7321	-22.07	2.48	9.04	-0.32	11.30	Sbc	S_late	B
UGC12127	-22.49	3.31	9.71	-0.31	11.65	E	E_S0	A
UGC12185	-21.26	2.60	9.14	-0.25	10.99	Sb	S_early	B
UGC12224	-19.92	2.51	8.83	-0.27	10.41	Sc	S_late	A
NGC7489	-21.47	1.86	8.03	-0.27	11.18	Sbc	S_late	A
NGC7549	-20.97	2.46	8.92	-0.28	10.77	Sbc	S_late	B
NGC7562	-21.88	2.86	9.76	-0.15	11.31	E	E_S0	A
NGC7591	-21.31	2.38	8.99	-0.33	10.95	Sbc	S_late	B
NGC7631	-20.70	2.54	9.10	-0.34	10.77	Sb	S_early	A
NGC7653	-21.11	2.12	8.84	-0.40	10.82	Sb	S_early	A
NGC7671	-21.28	2.73	9.40	-0.23	11.03	S0	E_S0	A
NGC7683	-21.14	2.89	9.66	-0.21	11.01	S0	E_S0	A
NGC7716	-20.29	2.49	9.13	-0.37	10.65	Sb	S_early	A
UGC12816	-20.28	1.85	8.38	-0.23	10.34	Sc	S_late	A
UGC12864	-20.09	2.65	8.77	-0.29	10.38	Sc	S_late	B
NGC7800	-18.37	1.41	8.49	-0.33	9.67	Sd	S_late	AB



Figura 2.8: Mosaico com as imagens RGB da amostra de galáxia utilizando nas análises, obtidas do SDSS Survey.

## Estimadores Geométricos e Estruturais da Distribuição da Emissão em H $\alpha$

Neste capítulo vamos utilizar alguns parâmetros geométricos para medir propriedades da distribuição de H $\alpha$  nas galáxias através do uso de ferramentas utilizadas em análise de imagens. Assim, os parâmetros calculados, e explicados em detalhes nas seções seguintes, são:

- Momentos invariantes de imagem e parâmetros derivados
- Raio médio e variância
- Medidas de Concentração
  - \* Concentração Efetiva em H $\alpha$
  - \* Concentração Central em H $\alpha$
- Classes morfológicas

### 3.1 Momentos invariantes de imagem

Momentos são quantidades úteis para descrever características significativas de uma imagem, tais como sua forma, centroides, semi-eixos da elipse e orientação do objeto (Kilian, 2001; Flusser et al., 2009). Para uma imagem, o momento de ordem (p+q) é definido como

$$M_{pq} = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} x_i^p y_j^q I(x_i, y_j)$$

onde  $n_x$  e  $n_y$  são o número de píxeis nas direções  $x$  e  $y$  e  $I(x,y)$  é a intensidade do píxel. No caso específico em que a imagem analisada é uma imagem binária, ou seja,  $I(x,y) = 0$  ou  $I(x,y) = 1$ , a definição acima calcula os momentos geométricos da imagem, que para efeitos de notação, chamaremos de  $M_{pq}^G$ . Entretanto, neste trabalho, estamos utilizando o fluxo emitido pelas galáxias, assim convém definirmos momentos fotométricos da imagem onde  $I(x,y) = F_{H\alpha}(x,y)$  é o fluxo emitido pela galáxia em cada píxel  $(x,y)$ .

A partir dessa definição de momentos, a área total ocupada pelo objeto (momento geométrico), o fluxo total e o centroide fotométrico são dados por

$$\begin{aligned} \text{Área} &= M_{00}^G = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} x_i^0 y_j^0 = N_T \\ F_{total} &= M_{00} = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} x_i^0 y_j^0 I(x_i, y_j) = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} I(x_i, y_j) \\ \{\bar{x}, \bar{y}\} &= \left\{ \frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right\} \end{aligned}$$

onde  $N_T$  é o número de píxeis do objeto total.

Uma vez que os momentos  $M_{pq}$  não são invariantes, é interessante definirmos os momentos centrais da imagem,  $\mu_{pq}$ , que são invariantes por translação, dado que são calculados em relação ao centro da imagem. Os momentos centrais de ordem  $(p+q)$  são dados por

$$\mu_{pq} = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} (x_i - \bar{x})^p (y_j - \bar{y})^q I(x_i, y_j).$$

Com a finalidade de garantir que os parâmetros derivados à partir dos momentos da imagem coincidam com parâmetros conhecidos previamente para os objetos, utilizamos a banda V reconstruída pelo Pipe3D para determinar os parâmetros geométricos utilizados ao longo do estudo.

### 3.1.1 Parâmetros Geométricos de Elipse

Ainda que cada momento central não tenha um significado explícito, é possível utilizar os momentos centrais de segunda ordem ( $p + q = 2$ ) para derivar alguns parâmetros geométricos interessantes. Assim, podemos estimar os parâmetros (semi-eixos  $a$  e  $b$ , elipticidade  $\epsilon$  e ângulo de posição  $\theta$ ) da elipse que melhor ajusta a imagem através de

$$a = \left( \frac{2(\mu_{20} + \mu_{02}) + \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{\mu_{00}} \right)^{1/2}$$

$$b = \left( \frac{2(\mu_{20} + \mu_{02}) - \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{\mu_{00}} \right)^{1/2}$$

$$\epsilon = 1 - \frac{b}{a}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right)$$

### 3.1.2 Raio médio e seu desvio padrão

Sendo  $(x_i, y_j)$ , com  $i = 1, \dots, n_x$  e  $j = 1, \dots, n_y$ , um conjunto de píxeis associados a uma dada galáxia de centro  $(\bar{x}, \bar{y})$ , seu raio médio é definido como

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i,$$

onde

$$N = n_x \times n_y = N_T,$$

$$R_i = \left( (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 \right)^{1/2},$$

e a variância de  $R$  será

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2.$$

Utilizando os momentos centrais definidos anteriormente, é possível representar o raio médio através de:

$$\bar{R} = \frac{(\mu_{20} + \mu_{02})^{1/2}}{\mu_{00}}$$

Uma vez que temos galáxias de diversos tamanhos, é conveniente normalizar o raio de cada galáxia com o raio efetivo,  $R_e$ , definido como o raio no qual está contido 50% do fluxo total emitido pela galáxia em uma dada banda.

Dessa forma, o raio médio e o desvio padrão normalizados pelo raio equivalente são dados por

$$\frac{\bar{R}}{R_e}, \quad \frac{\sigma_R}{R_e}$$

## 3.2 Medidas de Concentração

Como apresentado em 1.1.4, várias definições de concentração foram adotadas em estudos e esquemas de classificação das galáxias (Morgan e Mayall, 1957; Abraham et al., 1994; Shimasaku et al., 2001; Conselice, 2003), muito embora esse parâmetro sozinho seja

incapaz de separar eficientemente as galáxias do tipo tardio e tipo precoce (*late-types* e *early-types*). Para a concentração de luz na banda r,  $c_r$ , utilizaremos aquela definida por Strateva et al. (2001) como a razão entre os raios de Petrosian que contêm 90% e 50% ( $R_{90}$  e  $R_{50}$ , respectivamente) do fluxo na respectiva banda, em que a concentração de luz tende a ser maior que  $C = 2.63$  para galáxias precoces (elípticas e lenticulares) uma vez que se espera que tais sistemas possuem perfis de brilho mais concentrados que os de galáxias tardias.

### 3.2.1 Concentração Efetiva e Central em $H\alpha$

Uma vez que neste trabalho estamos analisando a emissão em  $H\alpha$ , convém estabelecer outras definições, especificamente para medir a concentração do fluxo medido na referida linha. Desse modo, definimos a Concentração Efetiva em  $H\alpha$  como

$$c_e(H\alpha) = \frac{R_e(H\alpha)}{a},$$

onde  $R_e$  é o raio efetivo da galáxia em  $H\alpha$ , ou seja, o raio que contém 50% das emissões em  $H\alpha$ , e  $a$  é o semi-eixo maior da galáxia, obtido via a análise de momentos na banda V descrita na seção 3.1.2.

Um outro parâmetro de concentração definido para caracterizar a emissão foi a Concentração Central em  $H\alpha$ ,  $c_c(H\alpha)$ . Sendo  $a$  o semi-eixo maior da elipse que ajusta a imagem em  $H\alpha$ , a concentração central é definida como a razão entre o fluxo em  $H\alpha$  na região central ( $R \leq 0.2a$ ) e o fluxo total em  $R \leq a$ , medido dentro das elipses. Assim, a concentração central é dada por

$$c_c(H\alpha) = \frac{I_{H\alpha}(0.2a)}{I_{H\alpha}(a)}$$

Da própria definição, tem-se que esse a concentração  $c_c(H\alpha)$  mede quanto do fluxo da linha provém da região central ( $\sim 0.2a$ ), de tal forma que objetos com grande fluxo central e rápido decréscimo do fluxo com o raio tendem a ter maiores valores de concentração central. É esperado que objetos cuja luminosidade em  $H\alpha$  sejam oriundos da atividade estelar no disco, e não na região nuclear, possuam  $c_c(H\alpha)$  menor.

### 3.3 Considerações Sobre as Concentrações

Considerando os parâmetros de concentração, a figura 3.1 mostra a distribuição das concentrações de luz na banda r, a concentração efetiva e a concentração central em  $H\alpha$  para todas as galáxias da amostra. Como já era esperado, a concentração de luz  $c_r$  exibe um comportamento bimodal, com as galáxias da amostra separadas em dois picos.

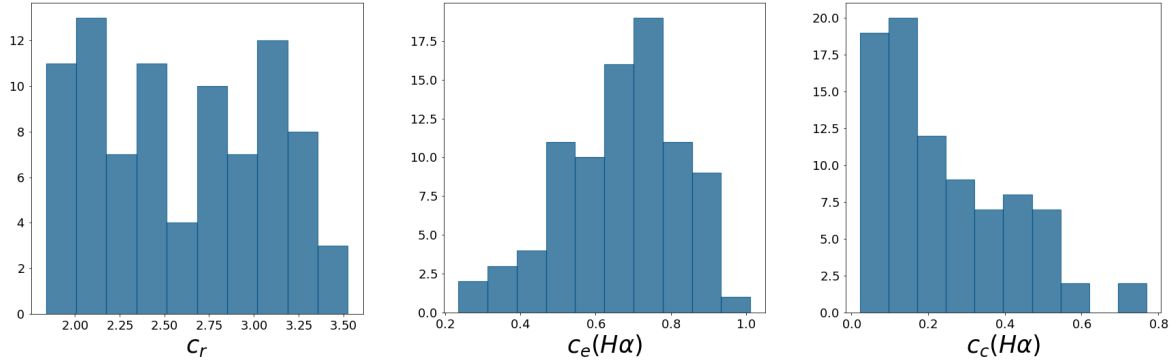


Figura 3.1: Distribuição das concentrações  $c_r$ ,  $c_e(H\alpha)$  e  $c_c(H\alpha)$  para as galáxias da amostra, onde a curva azul é dada pela densidade de probabilidade da variável.

A figura 3.2 exibe a correlação entre as concentrações de  $H\alpha$ , categorizadas pelas classes morfológicas em função de  $c_r$ , onde é possível ver os respectivos ajustes lineares. As galáxias da classe morfológica S\_late exibem uma anticorrelação mais acentuada entre  $c_r$  e  $c_e$  do que para as classes S\_early ( $\rho \sim 0.07$ ), enquanto as classes E\_S0 não apresenta nenhuma correlação ( $\rho \sim 0.00$ ). Já no caso da concentração central em função da concentração de luz, em todos os casos nota-se uma correlação, em que as espirais precoces e as tardias possuem correlação levemente mais acentuada ( $\rho \sim 0.41$  e  $\rho \sim 0.49$ , respectivamente) com a concentração  $c_r$  do que as elípticas e S0's ( $\sim 0.16$ ). Assim, em nossa amostra verificamos que a relação entre a concentração central e a concentração de luz  $c_r$  é mais acentuada para as galáxias espirais (embora a concentração média seja maior para as E e S0 que para as espirais).

Por último, a figura 3.3 exibe a correlação entre as concentrações  $c_c(H\alpha)$  e  $c_e(H\alpha)$ , em que pode-se notar uma anticorrelação forte entre elas ( $\sim -0.77$ ). Por último, mesmo que suave, a distribuição bidimensional mostra que há dois picos nas distribuição, corroborando com a ideia de uma amostra maioria poderia fazer expressiva a bimodalidades entre as concentrações.

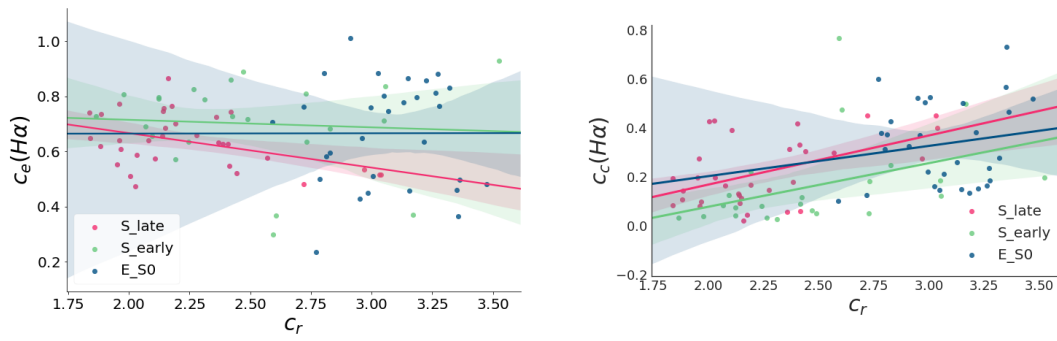


Figura 3.2: Correlação entre a concentração de luz na banda r,  $c_r$ , e as concentrações efetiva e central de  $H\alpha$ ,  $c_e(H\alpha)$  e  $c_c(H\alpha)$ . A área sombreada corresponde ao intervalo com 95% de confiança.

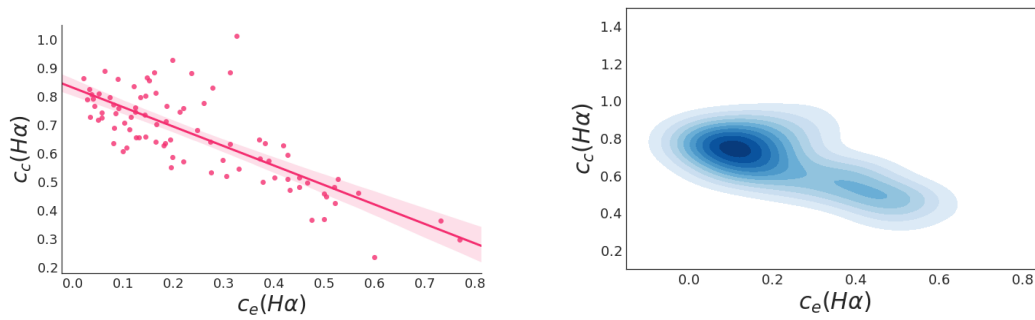


Figura 3.3: Correlação entre a concentração efetiva e central de  $H\alpha$ ,  $c_e(H\alpha)$  e  $c_c(H\alpha)$ , onde nota-se uma anticorrelação entre ambas.

Nos próximos capítulos veremos que os parâmetros de concentração definidos acima e o uso de três classes morfológicas são úteis para caracterizar a morfologia da emissão em  $H\alpha$ .



## Emissão em $H\alpha$ : Distribuição Radial, Propriedades e Análises

Neste capítulo abordamos a emissão em  $H\alpha$ , estudando sua distribuição radial, bem como suas propriedades e os principais resultados obtidos. A seção 4.1 descreve a importância dos perfis na astronomia e a metodologia utilizada para calcular os perfis, enquanto na seção 4.2 é discutido o esquema de classificação dos perfis radiais. As seções 4.4 e 4.5 abordam a análise das correlações dos perfis com parâmetros estruturais e com outras propriedades físicas das galáxias.

### 4.1 Perfis: Distribuição Radial de $H\alpha$

Como abordado no Capítulo 1, a emissão em  $H\alpha$  é de extrema importância nos estudos de formação e evolução das galáxias, uma vez que é um bom traçador das atividades que nelas ocorrem, enquanto que a análise da distribuição radial (perfil) de diversas propriedades é uma das principais ferramentas da astronomia, utilizada em diversas áreas para caracterizar e estudar galáxias, aglomerados, matéria escura e outros objetos (veja exemplos em Kormendy (1977); Strateva et al. (2001); Merritt et al. (2006); Gavazzi et al. (2007); Graham (2011); Beraldo e Silva et al. (2013)). Dentro do escopo desse trabalho, a distribuição radial da emissão em  $H\alpha$  é um instrumento útil para entender como essa emissão se relaciona com as propriedades das populações estelares e demais propriedades das galáxias da amostra.

Os mapas das linhas de emissão e das propriedades das galáxias obtidos com a *pipeline* Pipe3D fornecem uma visão da distribuição bidimensional das principais características desses objetos. Entretanto, analisar e comparar diretamente os mapas para as diferentes

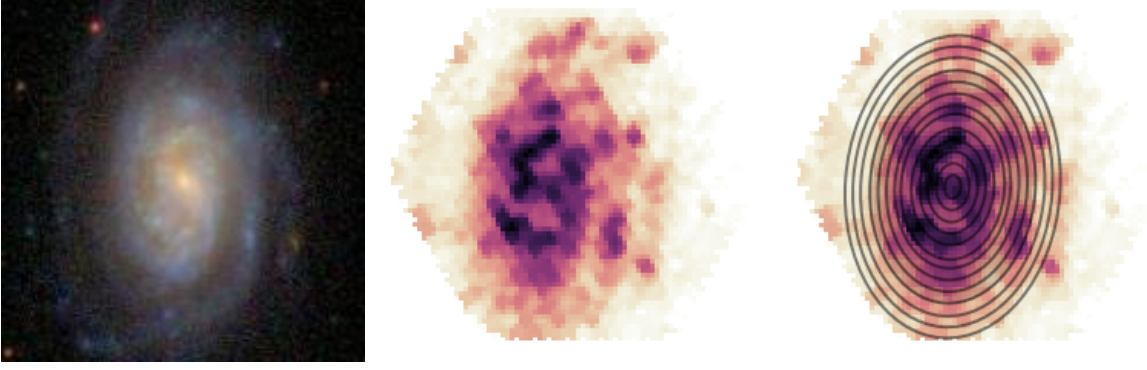


Figura 4.1: Galáxia NGC0237: imagem do SDSS e respectivo mapa de emissão em H $\alpha$ . A última figura da direita representa um esboço do ajuste realizado via momentos da imagem e os anéis elípticos utilizados para o cálculo do perfil (são apresentadas apenas 13 elipses e não as 50 usadas no ajuste do perfil).

galáxias da amostra não é tão intuitivo, de modo que o uso da distribuição radial como ferramenta de análise se mostra pertinente. Dessa forma, a emissão em H $\alpha$  dos objetos da amostra foi analisada com o auxílio da sua distribuição radial, em que os perfis foram construídos com o uso dos momentos invariantes da imagem (seção 3.1). Após encontrar a elipse que melhor se ajusta às emissões e determinar os semi-eixos maior e menor ( $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ ), o ângulo de inclinação  $\theta$  e a elipticidade  $\epsilon$  da elipse ajustada, fixam-se os valores de  $\theta$  e  $\epsilon$ , para então determinar o valor do semi-eixo maior  $a_i$  do  $i$ -ésimo píxel  $(x_i, y_i)$  através de

$$a_i = \sqrt{\frac{[(x_i - \bar{x})\sin\theta + (y_i - \bar{y})\cos\theta]^2 + [(x_i - \bar{x})\cos\theta + (y_i - \bar{y})\sin\theta]^2}{(1 - \epsilon)^2}}$$

Após calcular o valor  $a_i$  para cada píxel da imagem, os mesmos foram ordenados de forma crescente e divididos em 50 *bins* radiais (elipses concêntricas), de modo que cada *bin* tivesse a mesma quantidade de píxels. A figura 4.1 exibe a imagem, o mapa em H $\alpha$  e um esboço do ajuste elíptico com os *bins* anelares para a galáxia NGC0237. Para cada bin, calculou-se o valor médio de H $\alpha$  e o valor médio do semi-eixo maior  $\mathbf{a}$ , possibilitando a criação do perfil radial tal qual o mostrado na figura 4.2, em que as barras de erro são dadas pelo desvio padrão da média. É importante ressaltar que o ajuste de elipses é feito com base no mapa na banda V reconstruído pelo Pipe3D, de forma que o centro da mesma coincida com o centro da galáxia observado na faixa do visível. A fim de padronizar as medidas, o semi-eixo maior da elipse é normalizado pelo valor do raio equivalente  $R_{eq}$  definido em 3.1.2.

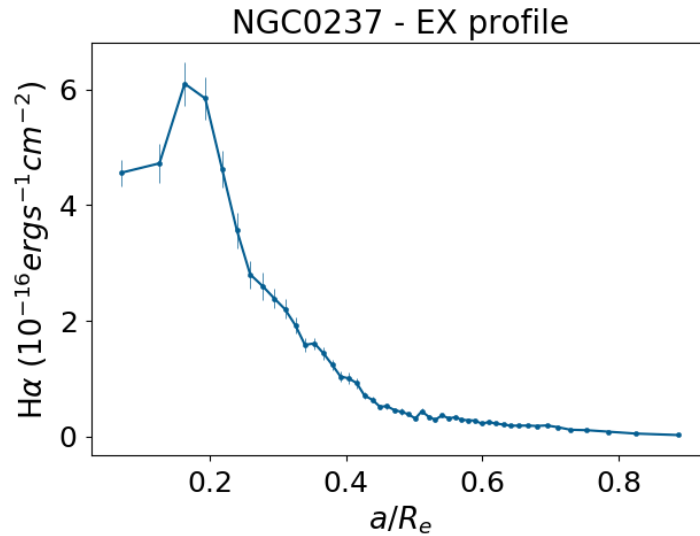


Figura 4.2: Perfil radial da emissão em  $H\alpha$  para a galáxia NGC0237, realizado como descrito em 4. As barras de erro representam o erro médio padrão de  $H\alpha$  em cada bin do ajuste.

## 4.2 Classificação Visual dos Perfis de $H\alpha$

Observando-se os perfis de  $H\alpha$  de toda a amostra, notou-se que os mesmos possuíam certas regularidades em sua forma, de modo que poderiam ser categorizadas segundo essas regularidades. A fim de padronizar os perfis e trocar a classificação mais objetiva, normalizamos todos os perfis com relação a máxima emissão em  $H\alpha$ . A primeira característica notável é que os perfis se separam em dois grupos: os perfis cuja máxima emissão está localizada no centro e que chamamos de perfil C (de Central); e os os perfis cuja emissão máxima está em qualquer região ao longo da extensão da galáxia e que chamamos de EX (de Extensão). A figura 4.3 mostra a distribuição dos raios de máxima emissão,  $R_{ME}$ , para as nossa amostra, onde é possível notar que a maior parte das galáxias possuem emissão em  $H\alpha$  máxima no centro.

Em um segundo momento, analisando o comportamento dos perfis categorizados como C, notamos que tais perfis também apresentam uma dualidade: alguns perfis possuem toda a emissão em  $H\alpha$  na região próxima ao centro, enquanto alguns perfis exibem emissão em  $H\alpha$  ao longo de toda a extensão, podendo inclusive ter picos secundários de emissão. Observando a distribuição das concentrações  $c_r$ ,  $c_e(H\alpha)$  and  $c_c(H\alpha)$  (figura 4.4), nota-se que a distribuição de  $c_r$  pode ser um ótimo atributo secundário, para separar os perfis C em dois subtipos: chamamos de CE os perfis C cuja concentração  $c_r$  corresponda a objetos

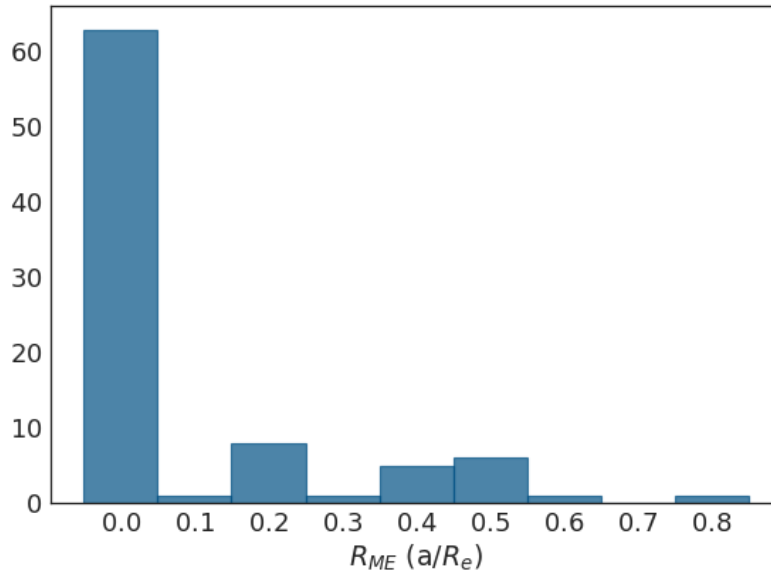


Figura 4.3: Distribuição do raio de máxima emissão em  $H\alpha$ ,  $R_{ME}$ , para nossa amostra. Para cerca de 3/4 da amostra, a máxima emissão se encontra no centro da galáxia.

*early-types* ( $c_r > 2.63$ ) e de CL os perfis C cuja concentração  $c_r$  corresponda a objetos *late-types* ( $c_r < 2.63$ ). Dessa forma, nossa amostra final é classificada em três tipos de perfis: **CE**, **CL** e **EX**, com 36, 27 e 23 objetos, respectivamente.

A figura 4.5 à esquerda exibe um exemplo de cada um dos três tipos de perfis radiais, enquanto que os gráficos à direita mostram todos os perfis normalizados de um dado tipo empilhados em um mesmo gráfico. Os perfis radiais de todas as galáxias, bem como seus mapas de emissão em  $H\alpha$ , podem ser vistos no apêndice A.

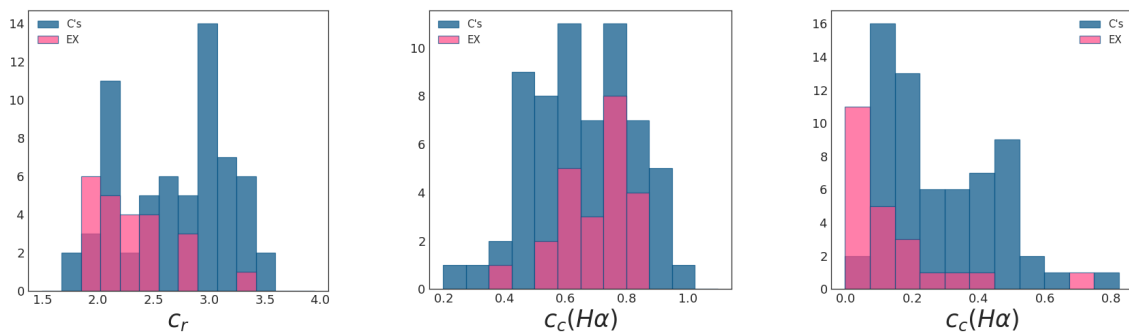


Figura 4.4: Distribuição das concentrações  $c_r$ ,  $c_e(H\alpha)$  and  $c_c(H\alpha)$  para as galáxias da amostra, separadas pelos perfis C e EX.

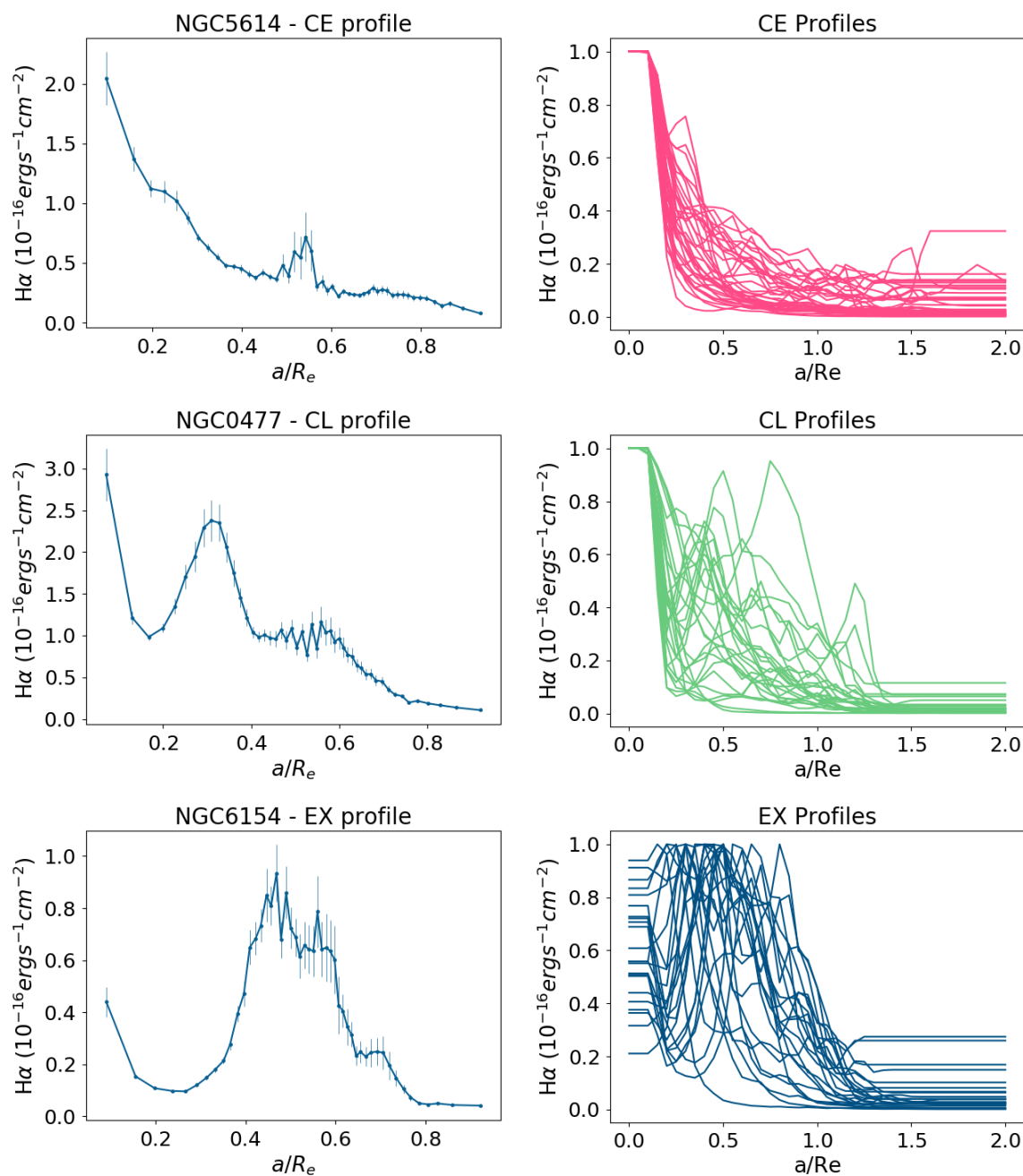


Figura 4.5: Os três tipos de perfis radiais de H $\alpha$ . De cima para baixo: Perfil **CE**, Perfil **CL**, e Perfil **EX**. As figuras do lado esquerdo exibem um exemplo de cada perfil, enquanto que as figuras do lado direito exibem todos os perfis de cada tipo normalizados.

### 4.3 A Morfologia das Galáxias e Seus Perfis

Avaliamos a correspondência entre os tipos de perfil e as classes morfológicas (figura 4.6 e tabela de contingência 4.1), para verificar se existe alguma relação entre as duas características  $e$ , para isso, utilizamos o teste de  $\chi^2$  para determinar se as variáveis são

independentes (hipótese nula) ou não. Considerando que foi obtido  $\chi^2 \sim 53$  com valor  $p = 8.5 \times 10^{-11}$ , confirmamos então que os tipos morfológicos e os perfis não são independentes, possuindo algum grau de associação.

	CE	CL	EX
E_S0	28	1	1
S_early	4	8	11
S_late	4	18	11

Tabela 4.1 - Tabela de contingência dos perfis e das classes morfológicas, com a quantidade de galáxias em cada perfil e classe morfológica.

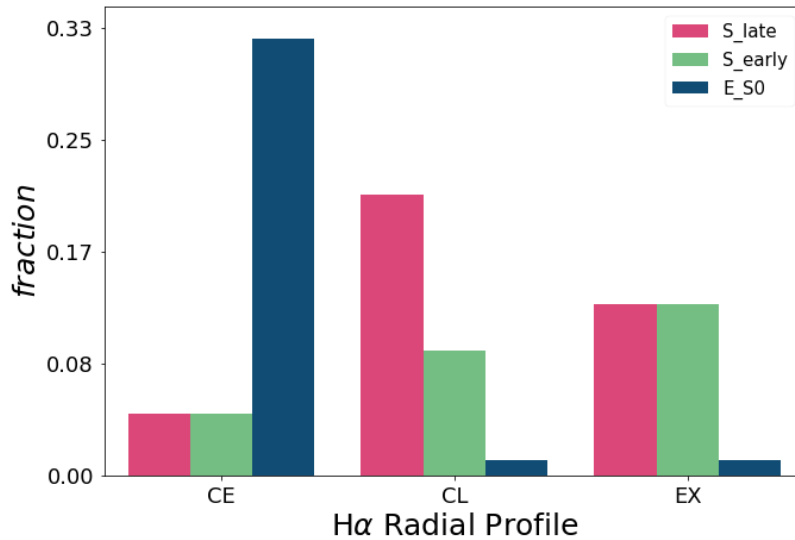


Figura 4.6: Proporção das classes morfológicas (E\_S0, S\_early e s\_late) em cada tipo de perfil (CE, CL e EX).

É interessante notar que os perfis CE são majoritariamente compostos por galáxias E\_S0, enquanto que o perfil CL possui majoritariamente galáxias espirais, tanto S\_early quanto S\_late. Os perfis EX, assim como CL, são dominados por objetos espirais. Analisando os perfis CL expostos no apêndice A, pode-se notar que  $\sim 75\%$  dos perfis classificados como CL exibem ao menos um pico de emissão secundário ao longo da extensão da galáxia. Uma vez que os perfis CL são dominados por galáxias espirais, é consistente supor que tais picos secundários estejam associados à braços e anéis no corpo do objeto. Ainda, vale notar que os únicos objetos E\_S0 classificados como CL ou EX (NGC1349 e NGC5784) também

exibem picos de emissão em  $H\alpha$  fora do centro. Como argumenta Gomes et al. (2016), esses picos podem estar associados à atividade estelar recente, sugerindo que nem todos os objetos *early-type* são passivos, podendo inclusive serem indicativos de outros processos internos e externo às galáxias mais velhas.

A tabela B.1 do apêndice complementa a tabela 2.2 com as classes morfológicas, perfil de  $H\alpha$ , taxa de formação estelar (SFR) e concentrações  $c_r$ ,  $c_e(H\alpha)$  e  $c_c(H\alpha)$  das galáxias amostradas. As correlações entre os perfis, classes morfológicas e os demais parâmetros físicos das galáxias serão explorados nas seções a seguir.

#### 4.4 Correlações com os Parâmetros de Concentração

As concentrações de luz são bastante utilizadas para classificar galáxias tardias e precoces, como mencionado em 3.2. Discutimos as concentrações sob o aspecto das classes morfológicas na seção 3.3 e, a seguir, iremos analisá-las levando em consideração a classificação dos perfis de  $H\alpha$ .

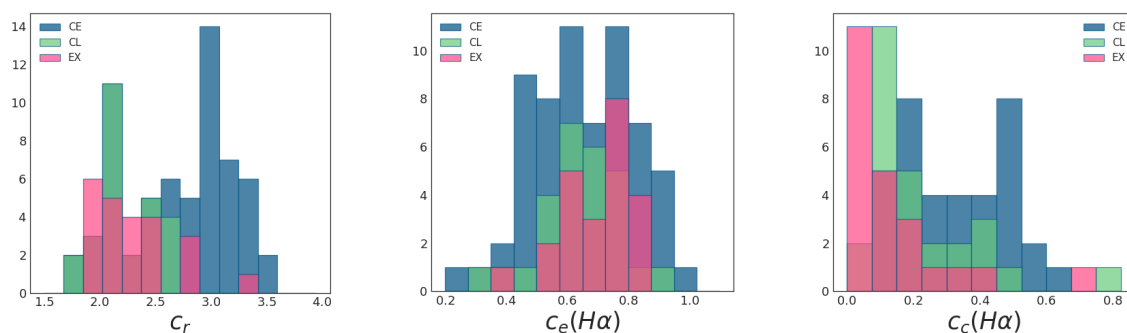


Figura 4.7: Distribuição das concentrações  $c_r$ ,  $c_e(H\alpha)$  and  $c_c(H\alpha)$  para as galáxias da amostra, separadas pelos perfis CE, CL e EX.

A figura 4.7 mostra a distribuição das concentrações para cada perfil, enquanto a figura 4.8 exhibe os diagramas de violino, onde se observa a densidade de probabilidade sobreposto ao boxplot das variáveis. Pela distribuição da figura 4.7, podemos verificar que os perfis EX acompanham os perfis CL, estando principalmente ocupando a região com  $c_r < 2.63$ . Já as concentrações  $c_c(H\alpha)$  e  $c_e(H\alpha)$  se mostra ineficiente para separar os tipos de perfis, embora a concentração  $c_c(H\alpha)$  dos perfis CL e EX possuam tendência de ser menor do que para os perfis CE.

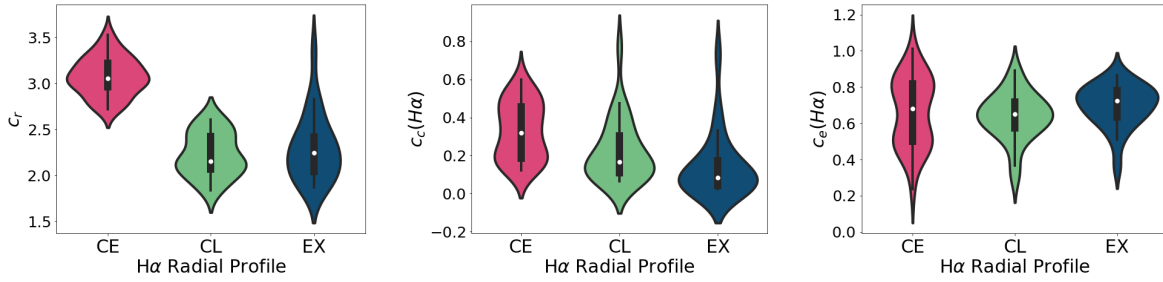


Figura 4.8: Concentrações discriminadas pelos perfis.

Profile	$c_r$	$c_c(H\alpha)$	$c_e(H\alpha)$	$\log(t^*/\text{Gyr})$	$\log(Z/Z_\odot)$	$\log(M_*/M_\odot)$
CE	$3.07 \pm 0.03$	$0.33 \pm 0.02$	$0.66 \pm 0.03$	$9.49 \pm 0.05$	$-0.23 \pm 0.01$	$11.15 \pm 0.07$
CL	$2.22 \pm 0.04$	$0.22 \pm 0.03$	$0.64 \pm 0.02$	$8.90 \pm 0.07$	$-0.29 \pm 0.01$	$10.61 \pm 0.10$
EX	$2.29 \pm 0.07$	$0.14 \pm 0.03$	$0.70 \pm 0.02$	$9.12 \pm 0.07$	$-0.31 \pm 0.01$	$10.80 \pm 0.09$

Tabela 4.2 - Valores médios e o erro padrão das concentrações e dos parâmetros das populações estelares, discriminadas pelos tipos de perfis.

## 4.5 Perfis de $H\alpha$ e as Propriedades das Populações Estelares

Uma vez que observam-se correlações entre os perfis e as concentrações (parâmetros estruturais), é de se esperar que haja também correlações com parâmetros físicos das galáxias. Assim, a fim de compreender melhor qual o significado físico dos perfis de  $H\alpha$ , a seguir analisamos como eles se comportam quando comparados aos valores médios das principais propriedades das populações estelares (idade estelar, a metalicidade e a massa estelar).

### 4.5.1 Idade e Metalicidade

A estimativa das idades das galáxias é uma tarefa complicada e sujeita a muitas incertezas. Considerando uma galáxia como uma combinação linear das populações estelares existentes nela (populações estelares compostas) e que as propriedades dessas populações podem ser obtidos a partir do espectro integrado da galáxia, a síntese espectral é um método bastante difundido para a determinação da idade das galáxias.

Como discutido em 2.2, a rotina Pipe3D gera um espectro para cada píxel do cubo de dados, sobre os quais é realizada a síntese espectral com o ajuste de templates de populações estelares simples (SSP, do inglês *Simple Stellar Population*), obtendo-se as



propriedades das populações estelares ajustadas, tais como idades e metalicidades médias e histórico de formação estelar. A biblioteca de populações estelares utilizada no ajuste é a biblioteca GSD156 (Cid Fernandes et al., 2013), derivada da extração de espectros estelares sintéticos da biblioteca GRANADA (Martins et al., 2005) e SSP's do projeto MILES (Sánchez-Blázquez et al., 2006), possuindo uma base com 156 templates de 39 idades distintas e 4 metalicidades.

A idade média de uma populações estelar é obtida através da combinação linear das idades dos espectros estelares utilizados no ajuste, sendo a idade média ponderada pela luminosidade  $\langle \log(t) \rangle_L$  dada por

$$\langle \log t \rangle_L = \sum_{i=1}^{N_*} \mathbf{x}_i \log t_i$$

onde  $\mathbf{x}_i$  é o peso da luminosidade associado à  $i$ -ésima SSP,  $\log t_i$  é a idade do espectro estelar, e  $N_*$  é a quantidade de SSP's ajustadas.

Além das idades, a metalicidade da galáxia também é derivada através do método de síntese espectral. De modo semelhante, a metalicidade da galáxia é dada pela combinação linear das metalicidades de cada SSP ajustada ao espectro da galáxia. A metalicidade ponderada pela luminosidade  $\langle Z \rangle_L$  é obtida através de

$$\langle Z \rangle_L = \sum_{i=1}^{N_*} \mathbf{x}_i Z_i$$

onde  $\mathbf{x}_i$  é o peso da luminosidade associado à  $i$ -ésima SSP,  $Z_i$  é a metalicidade do espectro estelar, e  $N_*$  é a quantidade de SSP's ajustadas.

Diversos estudos têm utilizado a idade e a metalicidade como traçadores de outras propriedades das galáxias (veja alguns exemplos em Gallazzi et al. (2005, 2008); Peletier (2013); González Delgado et al. (2014); Zibetti et al. (2017)). Sabe-se hoje que a idade estelar e a metalicidade estão correlacionadas com as cores, massas estelares e taxas de formação estelar dos objetos, em que é esperado que objetos mais velhos e massivos tenham tendência a ser mais avermelhados e metálicos, em contraposição aos objetos mais novos e de baixa massa, que possuem menores metalicidades e são mais azuis. Entretanto, também é bastante conhecido que existem diversas degenerescências entre as propriedades das populações estelares, fazendo com que a interpretação dos resultados dessas relações precise ser mais cautelosa (Worthey, 1994; Vazdekis e Arimoto, 1999; Vazdekis, 2008).

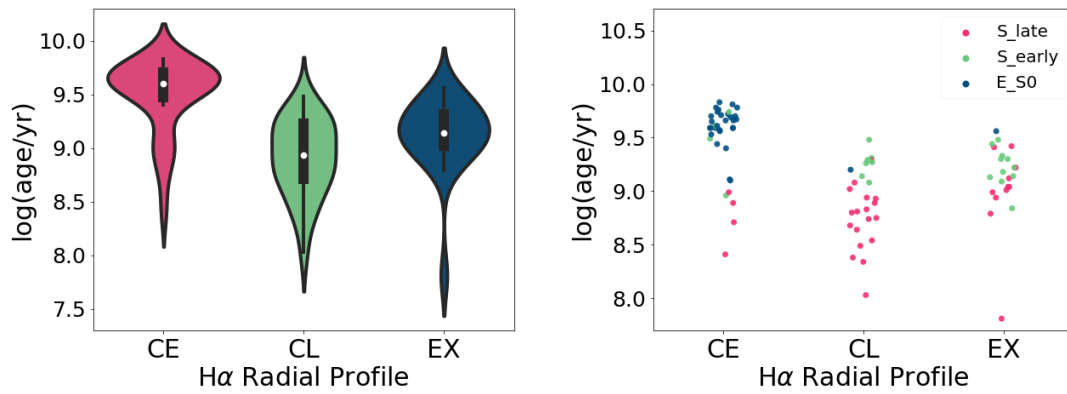


Figura 4.9: À esquerda: Diagrama de violino mostrando a distribuição e densidade de probabilidade das idades médias em cada tipo de perfil. À direita: dispersão das idades estelares média em cada tipo de perfil, separados pelas classes morfológicas.

A figura 4.9 mostra um diagrama do tipo violino (que mostra tanto a distribuição da densidade de probabilidade quanto o boxplot) e a dispersão para a idade estelar média em cada um dos 3 tipos de perfis de H $\alpha$ . É interessante notar que as idades médias corroboram com o encontrado para as classes morfológicas, uma vez que os perfis CL e EX possuem populações estelares mais jovens do que os perfis CE. Ainda, nota-se que a dispersão de idade média para os perfis EX é mais velho e concentrado do que os perfis CL.

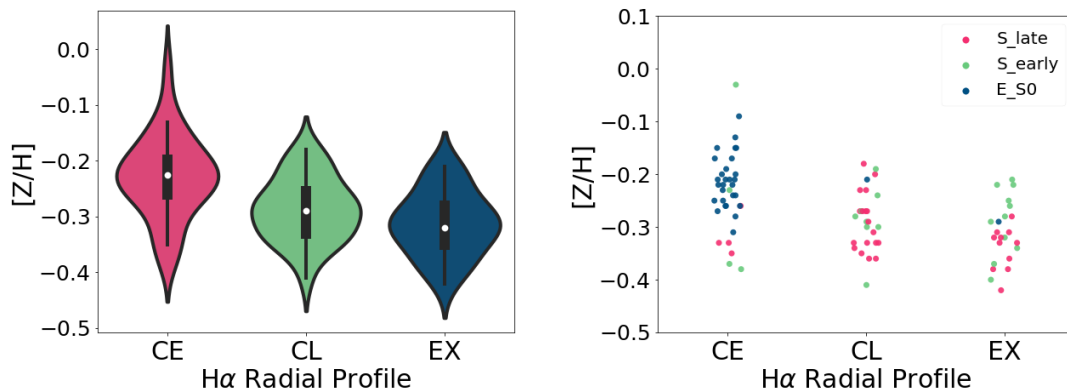


Figura 4.10: À esquerda: Diagrama de violino mostrando a distribuição e densidade de probabilidade das metalicidades médias em cada tipo de perfil. À direita: dispersão da metalicidade média em cada tipo de perfil, separados pelas classes morfológicas.

Já a análise das distribuições e dispersão das metalicidades (figura 4.10) exhibe um comportamento levemente decrescente, com o valor médio de metalicidade para cada perfil sendo menor do perfil CE para os perfis CL e EX. Considerando apenas os perfis CL e EX,

é significativo notar que embora a idade média seja menor para os perfis CL, esses perfis são mais metálicos do que os perfis EX.

#### 4.5.2 Massa Estelar Média

Outra propriedade fundamental das galáxias é a massa estelar, que é obtida a partir da síntese espectral das populações estelares, onde a combinação linear da massa estelar de cada população estelar que a compõe é dada por

$$\langle \log M_* \rangle = \sum_{i=1}^{N_*} x_i \log M_i$$

com

$$M_i = x_i \left( \frac{M}{L} \right)_i L$$

sendo a massa da  $i$ -ésima SSP, cuja razão massa-luminosidade é  $(\frac{M}{L})_i$ .

Os valores médios da massa estelar em cada perfil e classe morfológica são exibidos na figura 4.11. Assim como a idade média, a média da massa estelar se apresenta maior para os perfis CE do que os perfis CL e EX, sendo inclusive a dispersão mais concentrada para os objetos de perfil EX. A massa estelar média mais alta para o perfil CE já era esperado, uma vez que mais de 75% são objetos E\_S0.

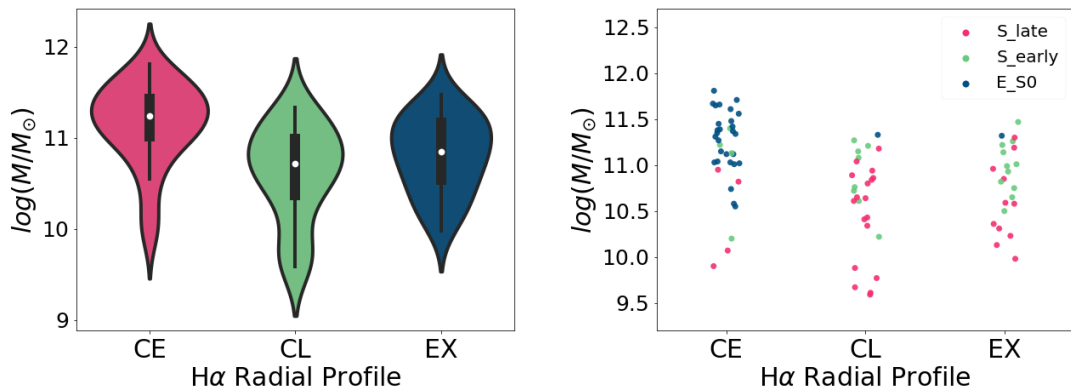


Figura 4.11: À esquerda: Diagrama de violino mostrando a distribuição e densidade de probabilidade das massas estelares em cada tipo de perfil. À direita: dispersão da massa estelar média em cada tipo de perfil, separados pelas classes morfológicas.

Os valores médios de idade estelar, metalicidade e massa estelar e suas respectivas dispersões podem ser vistos na tabela 4.2.

## 4.6 Natureza das emissões em $H\alpha$

Além da correlação entre os perfis e as propriedades das galáxias da amostra, é necessário examinar as possíveis origens dessa emissão. Novamente utilizando diagramas propostos por Baldwin et al. (1981), a figura 4.12 (à esquerda) mostra a posição das galáxias de cada tipo de perfil no diagrama BPT, onde estão delimitadas as regiões cuja emissão  $H\alpha$  é oriunda de atividade estelar (galáxias *Star-forming*), atividade nuclear (*AGN's* e *Liners*) e a região de transição onde a emissão pode vir de ambas fontes (Kewley et al., 2001; Kauffmann et al., 2003; Schawinski et al., 2007). O diagrama é feito considerando cada galáxia como um todo e, assim, utilizamos o valor médio das emissões em toda a galáxia.

Como já observado na seção 2.3.3, as galáxias da amostra inteira se encontram divididas entre a região *star-forming* e a região de transição. Entretanto, analisando os diagramas BPT à esquerda da figura 4.12, onde temos o diagrama para cada tipo de perfil, pode-se notar que a proporção de galáxias na região de transição diminui dos perfis CE para os perfis EX e CL, com a proporção de objetos *star-forming* aumentando. Ainda, os perfis EX possuem uma concentração maior próxima a linha de Kauffmann et al. (2003), com uma variação menor em ambas as razões de linhas.

Uma vez que os processos responsáveis pela emissão central e fora do centro podem ser distintos, analisamos os valores médios das emissões em duas regiões das galáxias: na região central ( $R < 0.2a$ ) e na região externa ( $R > 0.2a$ ). A figura 4.12 à direita exibe os diagramas para cada tipo de perfil, em que distinguimos a emissão na região central (vermelho) e na região externa (azul). Considerando a região central, as galáxias com perfil de  $H\alpha$  CE possui a maior parte de suas galáxias na região de transição ( $\sim 47\%$ ), com o restante dividido entre a região *star-forming* ( $\sim 36\%$ ) e a região de LINER ( $\sim 17\%$ ). Apenas dois objetos dentre os perfis CE se encontram sobre a linha de Schawinski et al. (2007), sugerindo que a região central de tais objetos possuem emissão  $H\alpha$  advinda de uma *seifert*.

Em contraposição, os perfis CL possuem mais objetos na região de *star-forming* ( $\sim 63\%$ ) do que na região de transição e LINER ( $\sim 22\%$  e  $\sim 15\%$ , respectivamente). As galáxias de perfil CL cuja emissão central está na região de formação estelar estão distribuídas em forma de uma cauda em direção a menores valores de  $N[II]/H\alpha$ , indicando

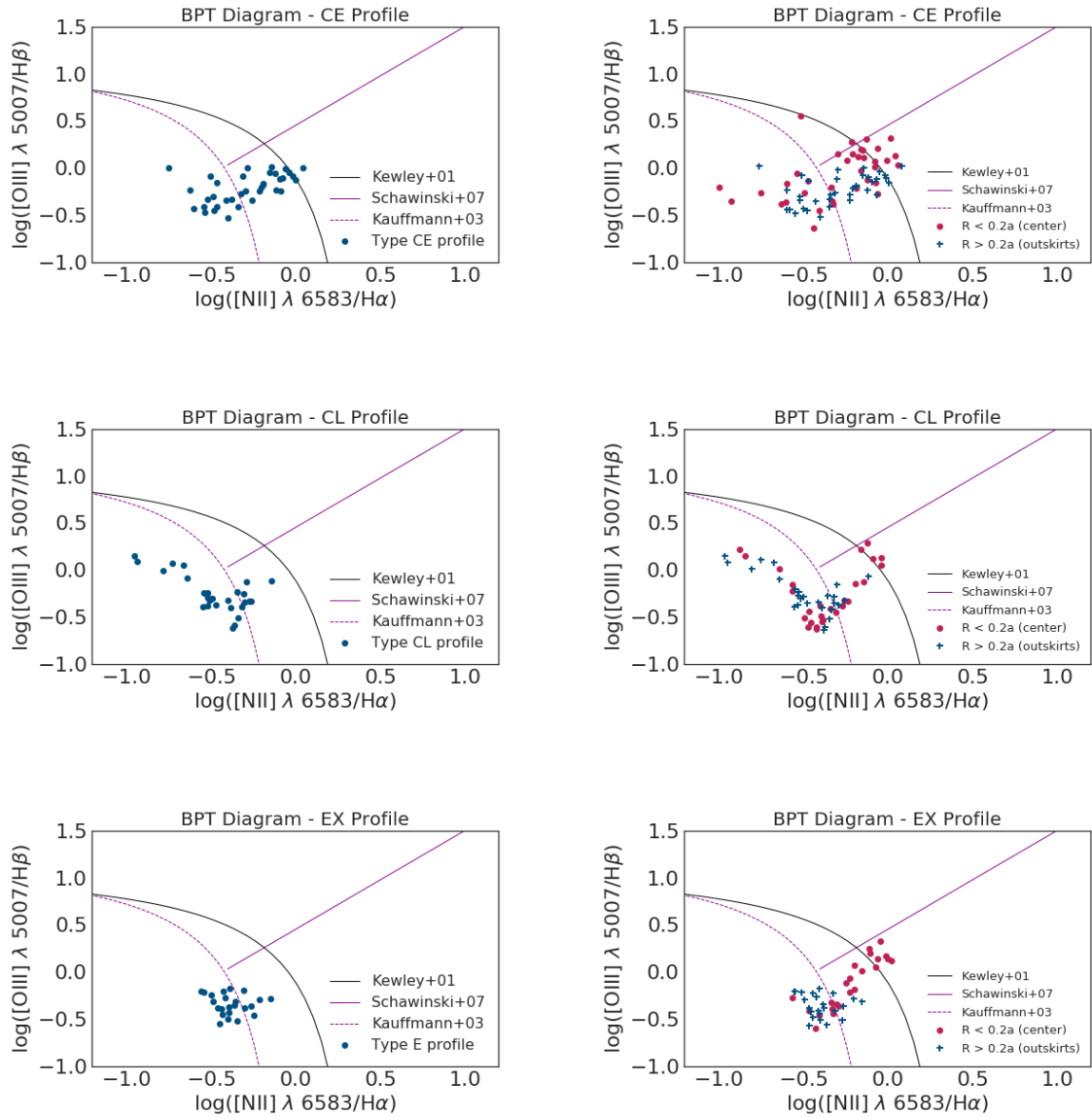


Figura 4.12: À esquerda: Diagramas BPT para cada um dos perfis de emissão em  $H\alpha$ ; à direita: Diagrama BPT para as galáxias de cada tipo de perfil, onde os pontos em vermelho denotam a emissão  $H\alpha$  para a região central ( $R < 0.2a$ ) e as cruzes em azul representam a mesma emissão na região externa ( $R > 0.2a$ ). Ainda, em cada diagrama estão marcados os limites entre emissão puramente de núcleos ativos, puramente estelar e região mista, com emissão de ambas origens (Kewley et al., 2001; Kauffmann et al., 2003; Schawinski et al., 2007).

que esses objetos possuem metalicidade central menor do que os perfis CE e EX. Por último, a distribuição de objetos entre as três regiões é mais homogênea para o perfil EX, com  $\sim 30.5\%$ ,  $\sim 39\%$  e  $\sim 30.5\%$  nas regiões *star-forming*, de transição e LINER, respectivamente.

#### 4.7 Considerações sobre os perfis

Considerando tanto as correlações dos perfis com as propriedades de populações estelares quanto com parâmetros estruturais, podemos perceber que os perfis possuem algumas propriedades úteis no estudo do comportamento observado nas galáxias. Os objetos com perfis CE são aqueles caracterizados por uma população estelar mais velha e mais metálica e maiores massas estelares. Em contraposição, os perfis CL e EX correspondem a objetos mais jovens, menos massivos e com metalicidades menores, tendo a distribuição das propriedades bastante semelhantes.

Outro ponto interessante é que, considerando o valor médio da emissão em  $H\alpha$  em toda a extensão da galáxia, os perfis CL e EX possuem mais objetos na região de formação estelar do que os perfis CE, tendo os perfis EX uma distribuição mais concentrada ao redor da linha de Kauffmann et al. (2003). A análise da emissão central e externa, por outro lado, mostra que ambas as regiões podem ter comportamento distinto, evidenciando que os perfis EX podem ter menores metalicidades centrais do que os perfis CE e CL.

## Conclusões

A emissão em  $H\alpha$  é de longe uma das mais importantes emissões estudadas na astrofísica extragaláctica e o presente trabalho apresentou uma proposta de classificação de sua emissão radial, em que a emissão de  $H\alpha$  pode ser classificada em três tipos de perfis: os perfis CE cujo pico de emissão de  $H\alpha$  máxima se encontra no centro da galáxia e que possui  $c_r > 2.63$ ; os perfis com emissão máxima no centro, mas com  $c_r < 2.63$ ; os perfis EX, cuja emissão em  $H\alpha$  máxima está na extensão da galáxia. Os três perfis mostraram correlações com parâmetros estruturais e físicos tanto das galáxias quanto das populações estelares nelas presentes.

No tocante às concentrações  $c_c(H\alpha)$  e  $c_e(H\alpha)$ , ambas não se mostraram efetivas para separar os perfis em uma distribuição bimodal (como no caso da  $c_r$ ), mas a concentração  $c_c$  exibiu uma tendência a ser menor dos perfis CE para CL e EX, mostrando que os perfis CE possuem realmente fluxo de emissão mais concentrado na região interna do que os demais perfis. A bimodalidade na concentração  $c_r$  entre CE e CL existe por construção, mas é interessante notar que os perfis EX estão, em sua maioria, no mesmo lado da distribuição dos perfis CL. Esses resultados mostram que a classificação dos perfis de  $H\alpha$  e os parâmetros estruturais estão relacionados e podem trazer informações adicionais quanto ao comportamento das estruturas das galáxias.

A separação das galáxias em três classes morfológicas principais foi bastante útil para entendermos qual a relação da morfologia com os perfis de  $H\alpha$  propostos. Utilizando o método de  $\chi^2$ , confirmou-se que a morfologia e os perfis possuem certo grau de associação, em que fica evidente que as galáxias de classe morfológica E\_S0 estão quase completamente sob os perfis CE. Ainda, é interessante notar que a distribuição de perfis CL e EX é bastante equilibrada entre as classes S\_early e S\_late, enquanto os perfis CE apresentam

apenas alguns objetos do tipo espiral.

Quando analisadas sob o viés das propriedades físicas das populações estelar, pode-se notar que os perfis exibiram a tendência de, em média, ter galáxias mais jovens nos perfis CL e EX, embora os perfis EX possuam valor mediano de idade, metalicidade e massa estelar levemente maior do que os perfis CL. A metalicidade média exibe um padrão similar à idade média das populações, no sentido de que os objetos mais metálicos são classificados como perfis CE, diminuindo em relação aos perfis CL e EX, sendo a distribuição de metalicidades entre os dois últimos bastante similar.

As massas estelares parecem ter comportamento similar às idades e metalicidades, no sentido de que os perfis CL e EX apresentam massas medianas menores (característicos de objetos mais jovens) do que as massas estelares dos perfis CE, o que já era esperado uma vez que tais perfis são compostos majoritariamente por objetos *early-type*.

Por fim, os diagramas BPT puderam nos trazer informações interessantes sobre a origem da emissão em  $H\alpha$ . Quando considerado os valores médios das emissões, evidenciou-se que a amostra utilizada nos estudos possui apenas um objeto com emissão puramente nuclear (AGN's), sendo os perfis CL e EX dominados por objetos com emissão oriunda de formação estelar, enquanto o perfil CE apresenta a maior parte dos objetos na região de transição, com emissão vinda tanto de atividade estelar quanto atividade nuclear. Entretanto, quando buscamos entender as emissões na região central ( $R < 0.2a$ ) e na região periférica ( $R > 0.2a$ ), percebe-se que todos os perfis exibem região central condizente com emissão  $H\alpha$  resultante de atividade de LINER, com os perfis CE e CL tendo praticamente a mesma proporção de objetos nessa região ( $\sim 17\%$  e  $\sim 15\%$ , respectivamente), em contraposição aos perfis EX que tem uma distribuição mais homogênea entre as três regiões. Considerando a emissão na região externa os perfis CE apresentam objetos na região de transição e de formação estelar, enquanto os demais perfis parecem ter sua emissão externa majoritariamente de atividade estelar.

Os resultados apresentados corroboram com o que foi encontrado por Li et al. (2015) e Spindler et al. (2018), que analisaram os históricos de formação estelar e taxa de formação estelar (SFR) nos projetos P-MaNGA e MaNGA. Spindler et al. (2018) estudaram os perfis radiais da taxa de formação estelar para quase 1500 objetos os classificou como "centralmente suprimido" e "não suprimido", dependendo de como se comportava a taxa de formação estelar na região central em comparação a extensão da galáxia. Em uma



---

primeira aproximação, poderíamos correlacionar nossos perfis CE e CL como sendo similar aos perfis de SFR "não suprimidos", enquanto que nosso perfil EX seria correspondente ao perfil de SFR "centralmente suprimido". As diferenças entre ambas as classificações podem ser devidas ao fato de a amostra que estudamos ser muito inferior àquela utilizada por Spindler et al. (2018).

Os resultados mostraram-se bastante interessantes, uma vez que existem correlações entre os perfis e as propriedades das populações estelares e parâmetros estruturais das galáxias. Com uma amostra maior de galáxias, poderemos estabelecer vínculos mais fortes entre os perfis e as propriedades físicas e estruturais das galáxias, trazendo novas formas de estudar as galáxias, além de evidenciar a utilidade da classificação de perfis de  $H\alpha$  aqui propostas.



## Perspectivas e Trabalhos Futuros

Com a conclusão da presente tese, ficou claro que há ainda muitos aspectos da evolução de galáxias que podem ser abordados com o uso de levantamentos utilizando IFU ou imagens multibandas. Ainda que tenha sido utilizada uma amostra de galáxias pequena, as análises mostraram resultados bastante relevantes, de modo que poderá ser bastante promissor a aplicação de uma análise semelhante em *surveys* maiores, com maior variedade e quantidade de galáxias.

O advento dos novos *surveys*, como os citados em 1.3, poderá abrir novas oportunidades de estudos e projetos como o aqui apresentado poderão ser utilizados para quantificar as galáxias sob novas perspectivas. Assim, pretende-se aprimorar as técnicas apresentadas e adaptá-las aos dados multi-bandas tais como os que serão produzidos pelos projetos J-PAS, J-PLUS e S-PLUS.



## Referências Bibliográficas

- Abraham R. G., Valdes F., Yee H. K. C., van den Bergh S., The morphologies of distant galaxies. 1: an automated classification system, *ApJ*, 1994, vol. 432, p. 75
- Abraham R. G., van den Bergh S., Nair P., A New Approach to Galaxy Morphology. I. Analysis of the Sloan Digital Sky Survey Early Data Release, *ApJ*, 2003, vol. 588, p. 218
- Ali A., Dopita M. A., Basurah H. M., Amer M. A., Alsulami R., Alruhaili A., IFU spectroscopy of southern planetary nebulae - III, *MNRAS*, 2016, vol. 462, p. 1393
- Annibali F., Bressan A., Rampazzo R., Zeilinger W. W., Vega O., Panuzzo P., Nearby early-type galaxies with ionized gas. IV. Origin and powering mechanism of the ionized gas, *A&A*, 2010, vol. 519, p. A40
- Arrieta A., Torres-Peimbert S., Broad H $\alpha$  Wings in Nebulae around Evolved Stars and in Young Planetary Nebulae, *ApJS*, 2003, vol. 147, p. 97
- Baade W., The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula., *ApJ*, 1944, vol. 100, p. 137
- Baldry I. K., Balogh M. L., Bower R. G., Glazebrook K., Nichol R. C., Bamford S. P., Budavari T., Galaxy bimodality versus stellar mass and environment, *MNRAS*, 2006, vol. 373, p. 469
- Baldry I. K., Glazebrook K., Brinkmann J., Ivezić Ž., Lupton R. H., Nichol R. C., Szalay A. S., Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies, *ApJ*, 2004, vol. 600, p. 681

- Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R., Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects, *PASP*, 1981, vol. 93, p. 5
- Belfiore F., Maiolino R., Bundy K., Masters K., Bershady M., Oyarzún G. A., Lin L., Cano-Diaz M., Wake D., Spindler A., Thomas D., Brownstein J. R., Drory N., Yan R., SDSS IV MaNGA - sSFR profiles and the slow quenching of discs in green valley galaxies, *MNRAS*, 2018, vol. 477, p. 3014
- Belfiore F., Maiolino R., Maraston C., Emsellem E., Bershady M. A., Masters K. L., Bizyaev D., Boquien M., Brownstein J. R., Bundy K., Diamond-Stanic A. M., Drory N., Heckman T. M., Law D. R., Malanushenko O., Oravetz A., Pan K., SDSS-IV MaNGA - the spatially resolved transition from star formation to quiescence, *MNRAS*, 2017, vol. 466, p. 2570
- Belfiore F., Maiolino R., Maraston C., Emsellem E., Bershady M. A., Masters K. L., Yan R., Bizyaev D., Boquien M., Brownstein J. R., Bundy K., Drory N., Heckman T. M., Law D. R., Roman-Lopes A., Pan K., Stanghellini L., Thomas D., Weijmans A.-M., Westfall K. B., SDSS IV MaNGA – spatially resolved diagnostic diagrams: a proof that many galaxies are LIERs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, vol. 461, p. 3111
- Bell E. F., Baugh C. M., Cole S., Frenk C. S., Lacey C. G., The properties of spiral galaxies: confronting hierarchical galaxy formation models with observations, *MNRAS*, 2003, vol. 343, p. 367
- Benitez N., Dupke R., Moles M., Sodre L., Cenarro J., Marin-Franch A., Taylor K., Cristobal D., Fernandez-Soto A., Mendes de Oliveira C., Cepa-Nogue J., Abramo L. R., Alcaniz J. S., Overzier R., J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey, *ArXiv e-prints*, 2014
- Beraldo e Silva L. J., Lima M., Sodré L., Testing phenomenological and theoretical models of dark matter density profiles with galaxy clusters, *MNRAS*, 2013, vol. 436, p. 2616
- Binette L., Magris C. G., Stasińska G., Bruzual A. G., Photoionization in elliptical galaxies by old stars, *A&A*, 1994, vol. 292, p. 13

- Blanton M. R., Moustakas J., Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2009, vol. 47, p. 159
- Boselli A., Fossati M., Gavazzi G., Ciesla L., Buat V., Boissier S., Hughes T. M., H $\alpha$  imaging of the Herschel Reference Survey. The star formation properties of a volume-limited, K-band-selected sample of nearby late-type galaxies, A&A, 2015, vol. 579, p. A102
- Bruzual G., Charlot S., Stellar population synthesis at the resolution of 2003, MNRAS, 2003, vol. 344, p. 1000
- 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., Thomas D., Tremonti C., Masters K., Coccato L., Diamond-Stanic A. M., Aragón-Salamanca Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory, ApJ, 2015, vol. 798, p. 7
- Calzetti D., , 2013 Star Formation Rate Indicators. p. 419
- Calzetti D., Kinney A. L., Storchi-Bergmann T., Dust extinction of the stellar continua in starburst galaxies: The ultraviolet and optical extinction law, ApJ, 1994, vol. 429, p. 582
- Caon N., Capaccioli M., D'Onofrio M., On the Shape of the Light Profiles of Early Type Galaxies, MNRAS, 1993, vol. 265, p. 1013
- Cappellari M., Emsellem E., Krajnović D., McDermid R. M., Scott N., Verdoes Kleijn G. A., Young L. M., Alatalo K., Bacon R., Blitz L., Bois M., Bournaud F., Bureau M., Davies R. L., The ATLAS<sup>3D</sup> project - I. A volume-limited sample of 260 nearby early-type galaxies: science goals and selection criteria, MNRAS, 2011, vol. 413, p. 813
- Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S., The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction, ApJ, 1989, vol. 345, p. 245
- Casado J., Ascasibar Y., Gavilán M., Terlevich R., Terlevich E., Hoyos C., Díaz A. I., Nature or nurture? Clues from the distribution of specific star formation rates in SDSS galaxies, MNRAS, 2015, vol. 451, p. 888

- Catalán-Torrecilla C., Gil de Paz A., Castillo-Morales A., Iglesias-Páramo J., Sánchez S. F., Kennicutt R. C., Pérez-González P. G., Marino R. A., Walcher C. J., Califa Collaboration Star formation in the local Universe from the CALIFA sample. I. Calibrating the SFR using integral field spectroscopy data, *A&A*, 2015, vol. 584, p. A87
- Cenarro A. J., Moles M., Cristóbal-Hornillos D., Marín-Franch A., Ederoclite A., Varela J., López-Sanjuan C., Hernández-Monteagudo C., Angulo R. E., Vázquez Ramió H., Viironen K., J-PLUS: The Javalambre Photometric Local Universe Survey, *ArXiv e-prints*, 2018
- Cid Fernandes R., González Delgado R. M., García Benito R., Pérez E., de Amorim A. L., Sánchez S. F., Husemann B., Falcón Barroso J., López-Fernández R., et al. Resolving galaxies in time and space. II. Uncertainties in the spectral synthesis of datacubes, *A&A*, 2014, vol. 561, p. A130
- Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Stasińska G., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method, *MNRAS*, 2005, vol. 358, p. 363
- Cid Fernandes R., Pérez E., García Benito R., González Delgado R. M., de Amorim A. L., Sánchez S. F., Husemann B., Falcón Barroso J., Sánchez-Blázquez P., Walcher C. J., Mast D., Resolving galaxies in time and space. I. Applying STARLIGHT to CALIFA datacubes, *A&A*, 2013, vol. 557, p. A86
- Cid Fernandes R., Stasińska G., Schlickmann M. S., Mateus A., Vale Asari N., Schoenell W., Sodré L., Alternative diagnostic diagrams and the ‘forgotten’ population of weak line galaxies in the SDSS, *MNRAS*, 2010, vol. 403, p. 1036
- Conselice C. J., The Relationship between Stellar Light Distributions of Galaxies and Their Formation Histories, *ApJS*, 2003, vol. 147, p. 1
- Conselice C. J., The fundamental properties of galaxies and a new galaxy classification system, *MNRAS*, 2006, vol. 373, p. 1389
- Conselice C. J., The Evolution of Galaxy Structure Over Cosmic Time, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2014, vol. 52, p. 291



- Croom S. M., Lawrence J. S., Bland-Hawthorn J., Bryant J. J., Fogarty L., Richards S., Goodwin M., Farrell T., Miziarski S., Heald R., Jones D. H., Lee S., Colless M., Brough S., Hopkins A. M., Bauer A. E., Birchall M. N., Ellis S., Horton A., The Sydney-AAO Multi-object Integral field spectrograph, *MNRAS*, 2012, vol. 421, p. 872
- De Caprio V., Giro E., Claudi R. U., Anselmi U., Bruno P., Cascone C., Desidera S., Gratton R., Lessio L., Lizon J. L., Mesa D., Scuderi S., Stadler E., Turatto M., Beuzit J. L., SPHERE-IFS: The spectro differential imager of the VLT for exoplanet search ., *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 2012, vol. 19, p. 376
- de Vaucouleurs G., Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques, *Annales d'Astrophysique*, 1948, vol. 11, p. 247
- de Vaucouleurs G., Classification and Morphology of External Galaxies., *Handbuch der Physik*, 1959, vol. 53, p. 275
- Devereux N. A., Jacoby G., Ciardullo R., H( $\alpha$ ) and Far-Infrared Emission Within the Early Type Spiral Galaxy M81, *AJ*, 1995, vol. 110, p. 1115
- Díaz-García L. A., Cenarro A. J., López-Sanjuan C., Ferreras I., Fernández-Soto A., González Delgado R. M., Márquez I., Masegosa J., Stellar populations of galaxies in the ALHAMBRA survey up to  $z \sim 1$ . III. The stellar content of the quiescent galaxy population during the last 8 Gyr, *ArXiv e-prints*, 2018
- Elmegreen D. M., Elmegreen B. G., Flocculent and grand design spiral structure in field, binary and group galaxies, *MNRAS*, 1982, vol. 201, p. 1021
- Emsellem E., Dejonghe H., Bacon R., Dynamical models of NGC 3115, *MNRAS*, 1999, vol. 303, p. 495
- Erb D. K., Shapley A. E., Pettini M., Steidel C. C., Reddy N. A., Adelberger K. L., The Mass-Metallicity Relation at  $z \lesssim 2$ , *ApJ*, 2006, vol. 644, p. 813
- Flusser J., Zitova B., Suk T., Moments and Moment Invariants in Pattern Recognition. Wiley Publishing, 2009
- Fritz A., Scodreggio M., Ilbert O., Bolzonella M., Davidzon I., Coupon J., Garilli B., Guzzo L., Zamorani G., Abbas U., Adami C., Arnouts S., Bel J., Bottini D., Branchini E.,

- Cappi A., Cucciati O., The VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS):. A quiescent formation of massive red-sequence galaxies over the past 9 Gyr, *A&A*, 2014, vol. 563, p. A92
- Gadotti D. A., Structural properties of pseudo-bulges, classical bulges and elliptical galaxies: a Sloan Digital Sky Survey perspective, *MNRAS*, 2009, vol. 393, p. 1531
- Gallazzi A., Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., A census of metals and baryons in stars in the local Universe, *MNRAS*, 2008, vol. 383, p. 1439
- Gallazzi A., Charlot S., Brinchmann J., White S. D. M., Tremonti C. A., The ages and metallicities of galaxies in the local universe, *MNRAS*, 2005, vol. 362, p. 41
- García-Lorenzo B., Sánchez S. F., Mediavilla E., González-Serrano J. I., Christensen L., Integral Field Spectroscopy of the Central Regions of 3C 120: Evidence of a Past Merging Event, *ApJ*, 2005, vol. 621, p. 146
- Gavazzi G., Boselli A., Cortese L., Arosio I., Gallazzi A., Pedotti P., Carrasco L.,  $H\alpha$  surface photometry of galaxies in nearby clusters, *A&A*, 2006, vol. 446, p. 839
- Gavazzi R., Treu T., Rhodes J. D., Koopmans L. V. E., Bolton A. S., Burles S., Massey R. J., Moustakas L. A., The Sloan Lens ACS Survey. IV. The Mass Density Profile of Early-Type Galaxies out to 100 Effective Radii, *ApJ*, 2007, vol. 667, p. 176
- Gomes J. M., Papaderos P., Vílchez J. M., Kehrig C., Iglesias-Páramo J., Breda I., Lehnert M. D., Sánchez S. F., Ziegler B., Dos Reis S. N., Bland-Hawthorn J., Galbany L., Califa Collaboration Spiral-like star-forming patterns in CALIFA early-type galaxies, *A&A*, 2016, vol. 585, p. A92
- González Delgado R. M., Cid Fernandes R., García-Benito R., Pérez E., de Amorim A. L., Cortijo-Ferrero C., Lacerda E. A. D., López Fernández R., Sánchez S. F., Vale Asari N., Alves J., Collaboration920 C., Insights on the Stellar Mass-Metallicity Relation from the CALIFA Survey, *ApJ*, 2014, vol. 791, p. L16
- González Delgado R. M., Cid Fernandes R., Pérez E., García-Benito R., López Fernández R., Lacerda E. A. D., Cortijo-Ferrero C., de Amorim A. L., Vale Asari N., Sánchez S. F.,

- Walcher C. J., Star formation along the Hubble sequence. Radial structure of the star formation of CALIFA galaxies, *A&A*, 2016, vol. 590, p. A44
- González Delgado R. M., Pérez E., Cid Fernandes R., García-Benito R., de Amorim A. L., Sánchez S. F., Husemann B., Cortijo-Ferrero C., The star formation history of CALIFA galaxies: Radial structures, *A&A*, 2014, vol. 562, p. A47
- Graham A. W., A review of elliptical and disc galaxy structure, and modern scaling laws. In *Planets, Stars and Stellar Systems*, T.D.Oswalt & W.C.Keel, eds. Berlin, Springer, 2013. Vol. 6, p.91-140 , 2011, p. 91
- Graham A. W., Driver S. P., A Concise Reference to (Projected) Sérsic  $R^{1/n}$  Quantities, Including Concentration, Profile Slopes, Petrosian Indices, and Kron Magnitudes, *PASA*, 2005, vol. 22, p. 118
- Graham A. W., Trujillo I., Caon N., Galaxy Light Concentration. I. Index Stability and the Connection with Galaxy Structure, Dynamics, and Supermassive Black Holes, *AJ*, 2001, vol. 122, p. 1707
- Green D. A., A colour scheme for the display of astronomical intensity images, *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 2011, vol. 39, p. 289
- Groves B., Brinchmann J., Walcher C. J., The Balmer decrement of Sloan Digital Sky Survey galaxies, *MNRAS*, 2012, vol. 419, p. 1402
- Harrison C., Observational constraints on the influence of active galactic nuclei on the evolution of galaxies, Durham University `¡EMAIL!c.m.harrison@durham.ac.uk¡/EMAIL!¿`, 2014, Tese de Doutorado
- Heckman T. M., An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei, *A&A*, 1980, vol. 87, p. 152
- Ho L. C., Nuclear Activity in Nearby Galaxies, *ARA&A*, 2008, vol. 46, p. 475
- Hubble E., Effects of Red Shifts on the Distribution of Nebulae, *ApJ*, 1936a, vol. 84, p. 517
- Hubble E. P., Extragalactic nebulae., *ApJ*, 1926, vol. 64

Hubble E. P., *Realm of the Nebulae*, 1936b

Hörtner H., Gardiner M., Haring R., Lindinger C., Berger F., , 2012 Spaxels, Pixels in Space A novel mode of spatial display

James P. A., Shane N. S., Beckman J. E., Cardwell A., Collins C. A., Etherton J., de Jong R. S., Fathi K., Knapen J. H., Peletier R. F., Percival S. M., Pollacco D. L., Seigar M. S., Stedman S., Steele I. A., The H $\alpha$  galaxy survey. I. The galaxy sample, H $\alpha$  narrow-band observations and star formation parameters for 334 galaxies, *A&A*, 2004, vol. 414, p. 23

Kauffmann G., The age of elliptical galaxies and bulges in a merger model, *MNRAS*, 1996, vol. 281, p. 487

Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Ridgway S. E., Brinkmann J., Fukugita M., Hall P. B., Ivezić Ž., Richards G. T., Schneider D. P., The host galaxies of active galactic nuclei, *MNRAS*, 2003, vol. 346, p. 1055

Kauffmann G., Heckman T. M., White S. D. M., Charlot S., Tremonti C., Brinchmann J., Bruzual G., Peng E. W., Seibert M., Bernardi M., Blanton M., Brinkmann J., Castander F., Stellar masses and star formation histories for  $10^5$  galaxies from the Sloan Digital Sky Survey, *MNRAS*, 2003, vol. 341, p. 33

Kennicutt Robert C. J., Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1998, vol. 36, p. 189

Kennicutt Jr. R. C., The rate of star formation in normal disk galaxies, *ApJ*, 1983, vol. 272, p. 54

Kennicutt Jr. R. C., Kent S. M., A survey of H-alpha emission in normal galaxies, *AJ*, 1983, vol. 88, p. 1094

Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S., Heisler C. A., Trevena J., Theoretical Modeling of Starburst Galaxies, *ApJ*, 2001, vol. 556, p. 121

Kilian J., *Simple Image Analysis by Moments - Version 0.2*, 2001

Kormendy J., Brightness distributions in compact and normal galaxies. II - Structure parameters of the spheroidal component, *ApJ*, 1977, vol. 218, p. 333

- Kormendy J., Kennicutt Jr. R. C., Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies, *ARA&A*, 2004, vol. 42, p. 603
- Koyama Y., Smail I., Kurk J., Geach J. E., Sobral D., Kodama T., Nakata F., Swinbank A. M., Best P. N., Hayashi M., Tadaki K.-i., On the evolution and environmental dependence of the star formation rate versus stellar mass relation since  $z=2$ , *MNRAS*, 2013, vol. 434, p. 423
- Lee H.-W., Hyung S., Broad  $H\alpha$  Wing Formation in the Planetary Nebula IC 4997, *ApJ*, 2000, vol. 530, p. L49
- Leethochawalit N., Kirby E. N., Moran S. M., Ellis R. S., Treu T., Evolution of the Stellar Mass–Metallicity Relation. I. Galaxies in the  $z \sim 0.4$  Cluster Cl0024, *The Astrophysical Journal*, 2018, vol. 856, p. 15
- Leitherer C., Schaerer D., Goldader J. D., González Delgado R. M., Robert C., Kune D. F., de Mello D. F., Devost D., Heckman T. M., Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation, *ApJS*, 1999, vol. 123, p. 3
- Li C., Wang E., Lin L., Bershady M. A., Bundy K., Tremonti C. A., Xiao T., Yan R., Bizyaev D., Blanton M., Cales S., Cherinka B., Cheung E., Drory N., Emsellem E., Fu H., Gelfand J., Law D. R., Lin L., MacDonald N., Maraston C., Masters K. L., Merrifield M. R., Pan K., Sánchez S. F., et al. P-MaNGA: Gradients in Recent Star Formation Histories as Diagnostics for Galaxy Growth and Death, *The Astrophysical Journal*, 2015, vol. 804, p. 125
- Logroño-García R., Vilella-Rojo G., López-Sanjuan C., Varela J., Viironen K., Muniesa D. J., Cenarro A. J., Cristóbal-Hornillos D., Ederoclite A., Marín-Franch A., J-PLUS: measuring  $H\alpha$  emission line fluxes in the nearby universe, *ArXiv e-prints*, 2018
- Luisi M., Anderson L. D., Balser D. S., Bania T. M., Wenger T. V., H II Region Ionization of the Interstellar Medium: A Case Study of NGC 7538, *ApJ*, 2016, vol. 824, p. 125
- Lundmark K., A preliminary classification of nebulae, *Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik*, 1926, vol. 19, p. 1

- Ma X., Hopkins P. F., Faucher-Giguère C.-A., Zolman N., Muratov A. L., Kereš D., Quataert E., The origin and evolution of the galaxy mass-metallicity relation, *MNRAS*, 2016, vol. 456, p. 2140
- Madau P., Dickinson M., Cosmic Star-Formation History, *ARA&A*, 2014, vol. 52, p. 415
- Maier C., Lilly S. J., Ziegler B. L., Contini T., Pérez Montero E., Peng Y., Balestra I., The Mass-Metallicity and Fundamental Metallicity Relations at  $z > 2$  Using Very Large Telescope and Subaru Near-infrared Spectroscopy of zCOSMOS Galaxies, *ApJ*, 2014, vol. 792, p. 3
- Maiolino R., Nagao T., Grazian A., Cocchia F., Marconi A., Mannucci F., Cimatti A., Pipino A., Ballero S., Calura F., Chiappini C., Fontana A., Silva L., AMAZE. I. The evolution of the mass-metallicity relation at  $z > 3$ , *A&A*, 2008, vol. 488, p. 463
- Maraston C., Greggio L., Renzini A., Ortolani S., Saglia R. P., Puzia T. H., Kissler-Patig M., Integrated spectroscopy of bulge globular clusters and fields. II. Implications for population synthesis models and elliptical galaxies, *A&A*, 2003, vol. 400, p. 823
- Marino R. A., Gil de Paz A., Sánchez S. F., Castillo-Morales A., CALIFA Team Studying nearby disk galaxies with the CALIFA survey., *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 2012, vol. 19, p. 290
- Mármol-Queraltó E., McLure R. J., Cullen F., Dunlop J. S., Fontana A., McLeod D. J., The evolution of the equivalent width of the H $\alpha$  emission line and specific star formation rate in star-forming galaxies at  $1 < z < 5$ , *MNRAS*, 2016, vol. 460, p. 3587
- Martel A. R., Ford H. C., Bradley L. D., Tran H. D., Menanteau F., Tsvetanov Z. I., Illingworth G. D., Hartig G. F., Clampin M., Dust and Ionized Gas in Nine Nearby Early-Type Galaxies Imaged with the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys, *AJ*, 2004, vol. 128, p. 2758
- Martin D. C., Wyder T. K., Schiminovich D., Barlow T. A., Forster K., Friedman P. G., Morrissey P., Neff S. G., Seibert M., Small T., Welsh B. Y., Bianchi L., Donas J., Heckman T. M., Lee Y.-W., Madore B. F., Milliard B., Rich R. M., Szalay A. S., Yi S. K., The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. III. Constraints on Evolution from the Blue to the Red Sequence, *ApJS*, 2007, vol. 173, p. 342

- 
- Martínez H. J., O'Mill A. L., Lambas D. G., The evolution of the bimodal colour distribution of galaxies in Sloan Digital Sky Survey groups, *MNRAS*, 2006, vol. 372, p. 253
- Martins L. P., González Delgado R. M., Leitherer C., Cerviño M., Hauschildt P., A high-resolution stellar library for evolutionary population synthesis, *MNRAS*, 2005, vol. 358, p. 49
- Mateus A., Sodr e L., Cid Fernandes R., Stasińska G., Schoenell W., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - II. The bimodality of the galaxy population revisited, *MNRAS*, 2006, vol. 370, p. 721
- Mathis J. S., Nebular dust and extinction in ionized nebulae. I - The Balmer decrement, *ApJ*, 1983, vol. 267, p. 119
- Merritt D., Graham A. W., Moore B., Diemand J., Terzić B., Empirical Models for Dark Matter Halos. I. Nonparametric Construction of Density Profiles and Comparison with Parametric Models, *AJ*, 2006, vol. 132, p. 2685
- Mickaelian A. M., Astronomical surveys and big data, *Baltic Astronomy*, 2016, vol. 25, p. 75
- Moles M., Benítez N., Aguerri J. A. L., Alfaro E. J., Broadhurst T., Cabrera-Caño J., Castander F. J., Cepa J., Cerviño M., Cristóbal-Hornillos D., Fernández-Soto A., The Alhambra Survey: a Large Area Multimediuim-Band Optical and Near-Infrared Photometric Survey, *AJ*, 2008, vol. 136, p. 1325
- Morgan W. W., Mayall N. U., A Spectral Classification of Galaxies, *PASP*, 1957, vol. 69, p. 291
- Nair P. B., Abraham R. G., A Catalog of Detailed Visual Morphological Classifications for 14,034 Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2010, vol. 186, p. 427
- Nelson D., Pillepich A., Springel V., Weinberger R., Hernquist L., Pakmor R., Genel S., Torrey P., Vogelsberger M., Kauffmann G., Marinacci F., Naiman J., First results from

- the IllustrisTNG simulations: the galaxy colour bimodality, *MNRAS*, 2018, vol. 475, p. 624
- Okamura S., Kodaira K., Watanabe M., Digital surface photometry of galaxies toward a quantitative classification. III - A mean concentration index as a parameter representing the luminosity distribution, *ApJ*, 1984, vol. 280, p. 7
- Osterbrock D. E., *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, 1989
- Panter B., Jimenez R., Heavens A. F., Charlot S., The cosmic evolution of metallicity from the SDSS fossil record, *MNRAS*, 2008, vol. 391, p. 1117
- Peletier R. F., , 2013 *Stellar Populations*. p. 353
- Ricci T. V., Steiner J. E., Menezes R. B., Integral field unit spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - I. Principal component analysis Tomography and nuclear activity, *MNRAS*, 2014, vol. 440, p. 2419
- Roberts M. S., Haynes M. P., Physical Parameters along the Hubble Sequence, *ARA&A*, 1994, vol. 32, p. 115
- Rosales-Ortega F. F., Díaz A. I., Kennicutt R. C., Sánchez S. F., PPAK wide-field Integral Field Spectroscopy of NGC 628 - II. Emission line abundance analysis, *MNRAS*, 2011, vol. 415, p. 2439
- Roth M. M., Kelz A., Fechner T., Hahn T., Bauer S.-M., Becker T., Böhm P., Christensen L., Dionies F., Paschke J., Popow E., Wolter D., Schmoll J., Laux U., Altmann W., PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. I. Design, Manufacture, and Performance, *PASP*, 2005, vol. 117, p. 620
- Salim S., Rich R. M., Charlot S., Brinchmann J., Johnson B. D., Schiminovich D., Seibert M., Mallery R., Heckman T. M., Forster K., Friedman P. G., Martin D. C., Morrissey P., Neff S. G., Small T., Wyder T. K., UV Star Formation Rates in the Local Universe, *ApJS*, 2007, vol. 173, p. 267
- Sánchez S. F., IFUs surveys, a panoramic view of galaxy evolution. In *Galaxies in 3D across the Universe* , vol. 309 of *IAU Symposium*, 2015, p. 85



- Sánchez S. F., García-Benito R., Zibetti S., Walcher C. J., Husemann B., Mendoza M. A., Galbany L., Falcón-Barroso J., Mast D., Aceituno J., Aguerri J. A. L., Alves J., Amorim A. L., Ascasibar Y., CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. IV. Third public data release, *A&A*, 2016, vol. 594, p. A36
- Sánchez S. F., Kennicutt R. C., Gil de Paz A., van de Ven G., Vílchez J. M., Wisotzki L., Walcher C. J., Mast D., Aguerri J. A. L., Albiol-Pérez S., Alonso-Herrero A., Alves J., Colaborations. C., CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation, *A&A*, 2012, vol. 538, p. A8
- Sánchez S. F., Pérez E., Sánchez-Blázquez P., García-Benito R., Ibarra-Mede H. J., González J. J., Rosales-Ortega F. F., Sánchez-Menguiano L., Ascasibar Y., Bitsakis T., Law D., Cano-Díaz M., Pipe3D, a pipeline to analyze Integral Field Spectroscopy Data: II. Analysis sequence and CALIFA dataproducts, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2016, vol. 52, p. 171
- Sánchez S. F., Pérez E., Sánchez-Blázquez P., González J. J., Rosales-Ortega F. F., Cano-Díaz M., López-Cobá C., Marino R. A., Gil de Paz A., Mollá M., López-Sánchez A. R., Ascasibar Y., Pipe3D, a pipeline to analyze Integral Field Spectroscopy Data: I. New fitting philosophy of FIT3D, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2016, vol. 52, p. 21
- Sánchez S. F., Rosales-Ortega F. F., Jungwiert B., Iglesias-Páramo J., Vílchez J. M., Marino R. A., Walcher C. J., Husemann B., Califa Collaboration Mass-metallicity relation explored with CALIFA. I. Is there a dependence on the star-formation rate?, *A&A*, 2013, vol. 554, p. A58
- Sánchez-Blázquez P., Peletier R. F., Jiménez-Vicente J., Cardiel N., Cenarro A. J., Falcón-Barroso J., Gorgas J., Selam S., Vazdekis A., Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra, *MNRAS*, 2006, vol. 371, p. 703
- Sánchez-Blázquez P., Rosales-Ortega F. F., Méndez-Abreu J., Pérez I., Sánchez S. F., Zibetti S., Aguerri J. A. L., Bland-Hawthorn J., Catalán-Torrecilla C., Cid Fernandes R., Stellar population gradients in galaxy discs from the CALIFA survey. The influence of bars, *A&A*, 2014, vol. 570, p. A6

- Sánchez-Menguiano L., Sánchez S. F., Pérez I., García-Benito R., Husemann B., Mast D., Mendoza A., Ruiz-Lara T., Ascasibar Y., Bland-Hawthorn J., Cavichia O., Califa Collaboration Shape of the oxygen abundance profiles in CALIFA face-on spiral galaxies, *A&A*, 2016, vol. 587, p. A70
- Sandage A., Sandage M., Kristian J., *Galaxies and the universe. Stars Stellar Syst.*, Chicago Univ. Press Chicago, IL, 1975
- Sarzi M., Falcón-Barroso J., Davies R. L., Bacon R., Bureau M., Cappellari M., de Zeeuw P. T., Emsellem E., Fathi K., Krajnović D., Kuntschner H., McDermid R. M., Peletier R. F., The SAURON project - V. Integral-field emission-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies, *MNRAS*, 2006, vol. 366, p. 1151
- Schawinski K., Thomas D., Sarzi M., Maraston C., Kaviraj S., Joo S.-J., Yi S. K., Silk J., Observational evidence for AGN feedback in early-type galaxies, *MNRAS*, 2007, vol. 382, p. 1415
- Sérsic J. L., Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 1963, vol. 6, p. 41
- Shimasaku K., Fukugita M., Doi M., Hamabe M., Ichikawa T., Okamura S., Sekiguchi M., Yasuda N., Brinkmann J., Csabai I., Ichikawa S.-I., Ivezić Z., Kunszt P. Z., Schneider D. P., Szokoly G. P., Watanabe M., York D. G., Statistical Properties of Bright Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Photometric System, *AJ*, 2001, vol. 122, p. 1238
- Singh R., van de Ven G., Jahnke K., Lyubenova M., Falcón-Barroso J., Alves J., Cid Fernandes R. and Galbany L., García-Benito R., Husemann B., Kennicutt R. C., Marino R. A., Márquez. The nature of LINER galaxies: Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes, *A&A*, 2013, vol. 558, p. A43
- Sodre L., Cuevas H., Global regularities in integrated galaxy spectra, *MNRAS*, 1997, vol. 287, p. 137
- Speagle J. S., Steinhardt C. L., Capak P. L., Silverman J. D., A Highly Consistent Framework for the Evolution of the Star-Forming “Main Sequence” from  $z \sim 0-6$ , *ApJS*, 2014, vol. 214, p. 15

- Spindler A., Wake D., Belfiore F., Bershadsky M., Bundy K., Drory N., Masters K., Thomas D., Westfall K., Wild V., SDSS-IV MaNGA: the spatial distribution of star formation and its dependence on mass, structure, and environment, *MNRAS*, 2018, vol. 476, p. 580
- Stasińska G., Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Asari N. V., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - III. How to distinguish AGN hosts, *MNRAS*, 2006, vol. 371, p. 972
- Stasińska G., Costa-Duarte M. V., Vale Asari N., Cid Fernandes R., Sodré L., Retired galaxies: not to be forgotten in the quest of the star formation - AGN connection, *MNRAS*, 2015, vol. 449, p. 559
- Stasińska G., Vale Asari N., Cid Fernandes R., Gomes J. M., Schlickmann M., Mateus A., Schoenell W., Sodré Jr. L., Seagal Collaboration Can retired galaxies mimic active galaxies? Clues from the Sloan Digital Sky Survey, *MNRAS*, 2008, vol. 391, p. L29
- Strateva I., Ivezić Ž., Knapp G. R., Narayanan V. K., Strauss M. A., Gunn J. E., Lupton R. H., Schlegel D., Bahcall N. A., Brinkmann J., Brunner R. J., Budavári T., Csabai I., Castander F. J., Doi M., Fukugita M., Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data, *AJ*, 2001, vol. 122, p. 1861
- Sulentic J. W., Marziani P., Dultzin-Hacyan D., Phenomenology of Broad Emission Lines in Active Galactic Nuclei, *ARA&A*, 2000, vol. 38, p. 521
- Sulentic J. W., Marziani P., Zwitter T., Calvani M., Dultzin-Hacyan D., On the Origin of Broad Fe K $\alpha$  and H I H $\alpha$  Lines in Active Galactic Nuclei, *ApJ*, 1998, vol. 501, p. 54
- Tacchella S., Carollo C. M., Förster Schreiber N. M., Renzini A., Dekel A., Genzel R., Lang P., Lilly S. J., Mancini C., Onodera M., Tacconi L. J., Wuyts S., Zamorani G., Dust Attenuation, Bulge Formation, and Inside-out Quenching of Star Formation in Star-forming Main Sequence Galaxies at  $z \sim 2$ , *ApJ*, 2018, vol. 859, p. 56
- Tinsley B. M., Evolution of the Stars and Gas in Galaxies, *Fund. Cosmic Phys.*, 1980, vol. 5, p. 287

- Tinsley B. M., Gunn J. E., Evolutionary synthesis of the stellar population in elliptical galaxies. I - Ingredients, broad-band colors, and infrared features, *ApJ*, 1976, vol. 203, p. 52
- Trager S. C., Faber S. M., Worthey G., González J. J., The Stellar Population Histories of Early-Type Galaxies. II. Controlling Parameters of the Stellar Populations, *AJ*, 2000, vol. 120, p. 165
- Tremonti C. A., Heckman T. M., Kauffmann G., Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Seibert M., Peng E. W., Schlegel D. J., Uomoto A., Fukugita M., Brinkmann J., The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey, *ApJ*, 2004, vol. 613, p. 898
- Tresse L., Maddox S. J., The H alpha Luminosity Function and Star Formation Rate at  $z$  approximately 0.2, *ApJ*, 1998, vol. 495, p. 691
- Trinchieri G., di Serego Alighieri S., H-alpha images of early type galaxies with hot gas, *AJ*, 1991, vol. 101, p. 1647
- Trouille L., Barger A. J., Tremonti C., The OPTX Project V: Identifying Distant AGNs, *ArXiv e-prints*, 2011
- Tsamis Y. G., Walsh J. R., Pequignot D., Barlow M. J., Liu X.-W., Danziger I. J., Integral-field Spectroscopy of Galactic Planetary Nebulae with VLT FLAMES, *The Messenger*, 2007, vol. 127
- Van den Bergh S., *Galaxy Morphology and Classification*. Cambridge University Press, 1998
- van Dokkum P. G., van der Marel R. P., The Star Formation Epoch of the Most Massive Early-Type Galaxies, *ApJ*, 2007, vol. 655, p. 30
- Vazdekis A., Resolving the Age-Metallicity Degeneracy. In *Pathways Through an Eclectic Universe*, vol. 390 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2008, p. 255
- Vazdekis A., Arimoto N., A Robust Age Indicator for Old Stellar Populations, *ApJ*, 1999, vol. 525, p. 144

- Vilella-Rojo G., Viironen K., López-Sanjuan C., Cenarro A. J., Varela J., Díaz-García L. A., Cristóbal-Hornillos D., Ederoclite A., Marín-Franch A., Moles M., Extracting  $H\alpha$  flux from photometric data in the J-PLUS survey, *A&A*, 2015, vol. 580, p. A47
- Walcher C. J., Wisotzki L., Bekeraité S., Husemann B., Iglesias-Páramo J., Backsmann N., Barrera Ballesteros J., Catalán-Torrecilla C., Cortijo C., del Olmo A., Garcia Lorenzo B., Falcón-Barroso J., CALIFA: a diameter-selected sample for an integral field spectroscopy galaxy survey, *A&A*, 2014, vol. 569, p. A1
- Willett K. W., Schawinski K., Simmons B. D., Masters K. L., Skibba R. A., Kaviraj S., Melvin T., Wong O. I., Nichol R. C., Cheung E., Lintott C. J., Fortson L., Galaxy Zoo: the dependence of the star formation-stellar mass relation on spiral disc morphology, *MNRAS*, 2015, vol. 449, p. 820
- Wolf M., Die Klassifizierung der kleinen Nebelflecken, Publikationen des Astrophysikalischen Instituts Koenigstuhl-Heidelberg, 1908, vol. 3, p. 109
- Worthey G., Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects, *ApJS*, 1994, vol. 95, p. 107
- 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., Neff S. G., Small T., Bianchi L., Donas J., Heckman T. M., The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. I. Basic Properties, *ApJS*, 2007, vol. 173, p. 293
- Zhu G., Blanton M. R., Moustakas J., Stellar Populations of Elliptical Galaxies in the Local Universe, *ApJ*, 2010, vol. 722, p. 491
- Zibetti S., Gallazzi A. R., Ascasibar Y., Charlot S., Galbany L., García Benito R., Kehrig C., de Lorenzo-Cáceres A., Lyubenova M., Márquez I., Sánchez S. F., Resolving the age bimodality of galaxy stellar populations on kpc scales, *MNRAS*, 2017, vol. 468, p. 1902
- Zurita A., Beckman J. E., Rozas M., Ryder S., The origin of the ionization of the diffuse ionized gas in spirals. II. Modelling the distribution of ionizing radiation in NGC 157, *A&A*, 2002, vol. 386, p. 801



# Apêndice





## Imagens e Perfis Radiais em H $\alpha$

A seguir estão os mapas da emissão em H $\alpha$  para cada galáxia da amostra, bem como seu perfil radial, ordenados pelos tipos de perfil Central, Floculento, Ring e Smooth. Os mapas foram construídos com o mapa de cores Cubehelix<sup>1</sup> e escala  $I = a \sinh(10 \times H\alpha/3)$ .

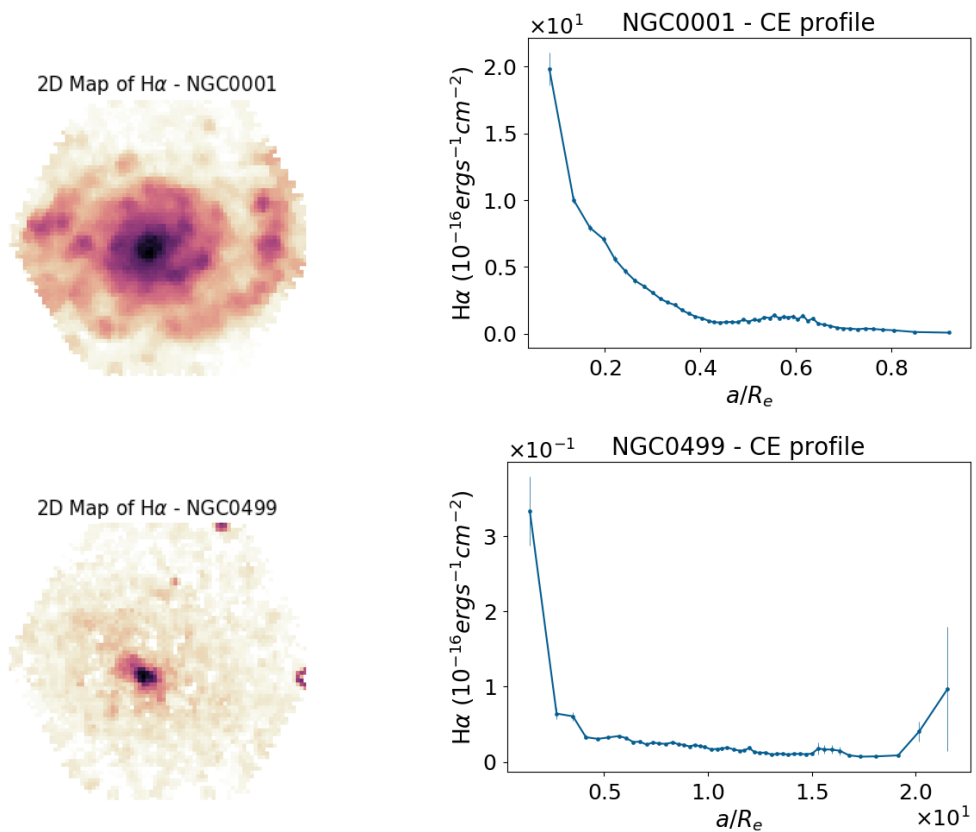


Figura A.1: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CE, para as galáxias da amostra.

<sup>1</sup> Mapa de cores Cubehelix (Green, 2011), com parâmetros `reverse=True`, `start=0.`, `rot=-0.5`. Tal mapa de cores foi desenvolvido especialmente para melhor visualização de imagens astronômicas.

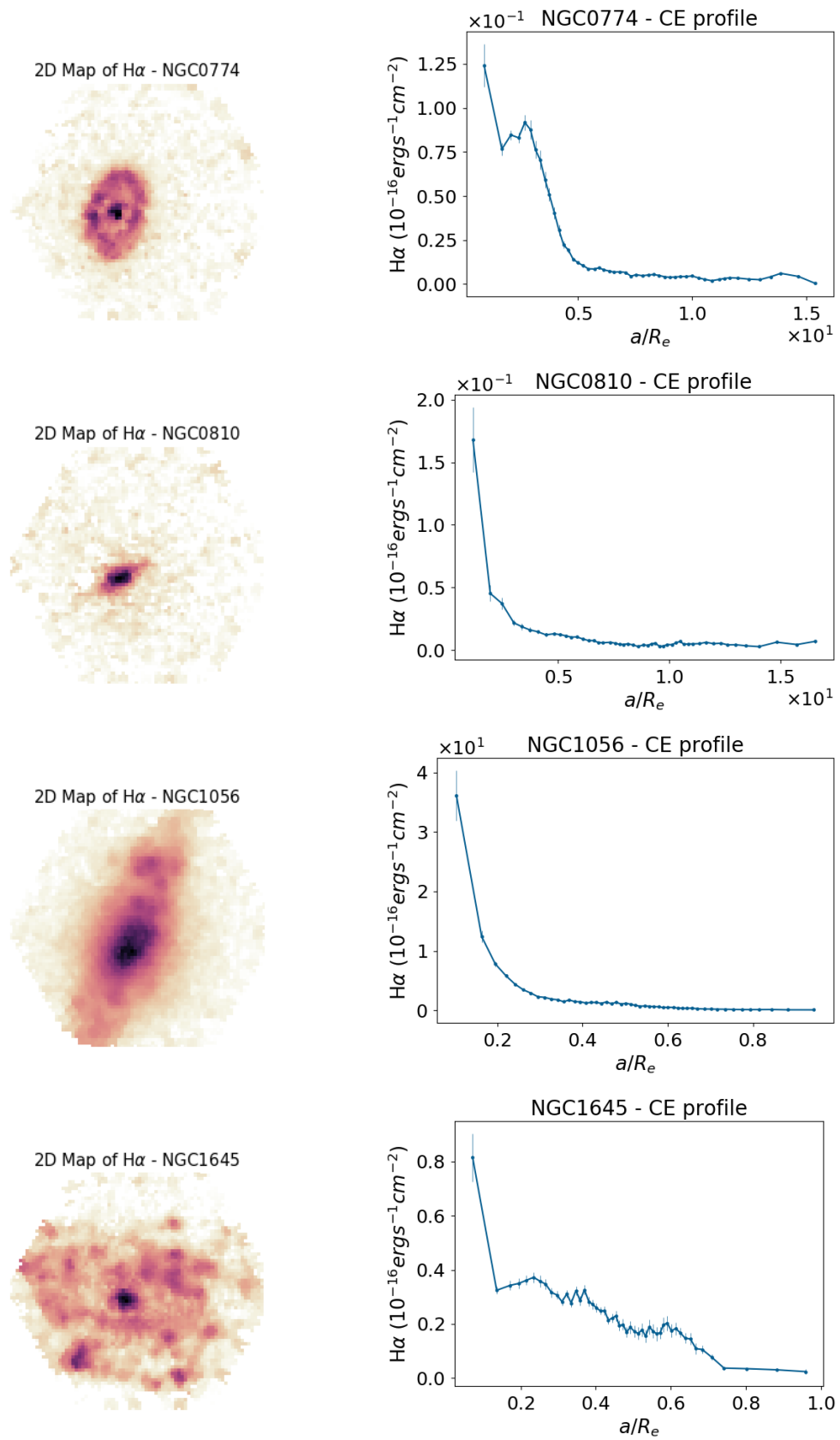


Figura A.2: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CE - cont.

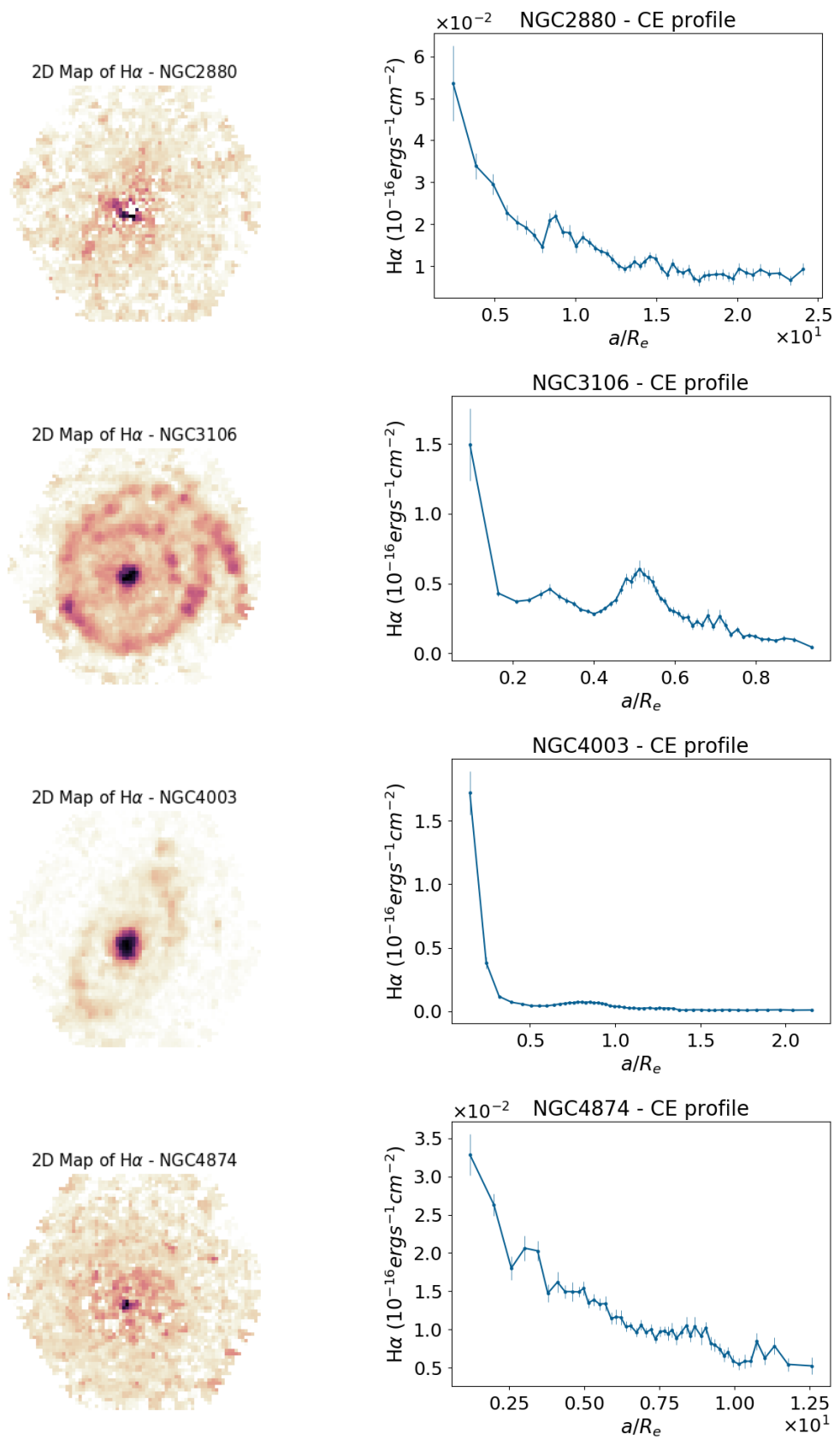


Figura A.3: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CE - cont.

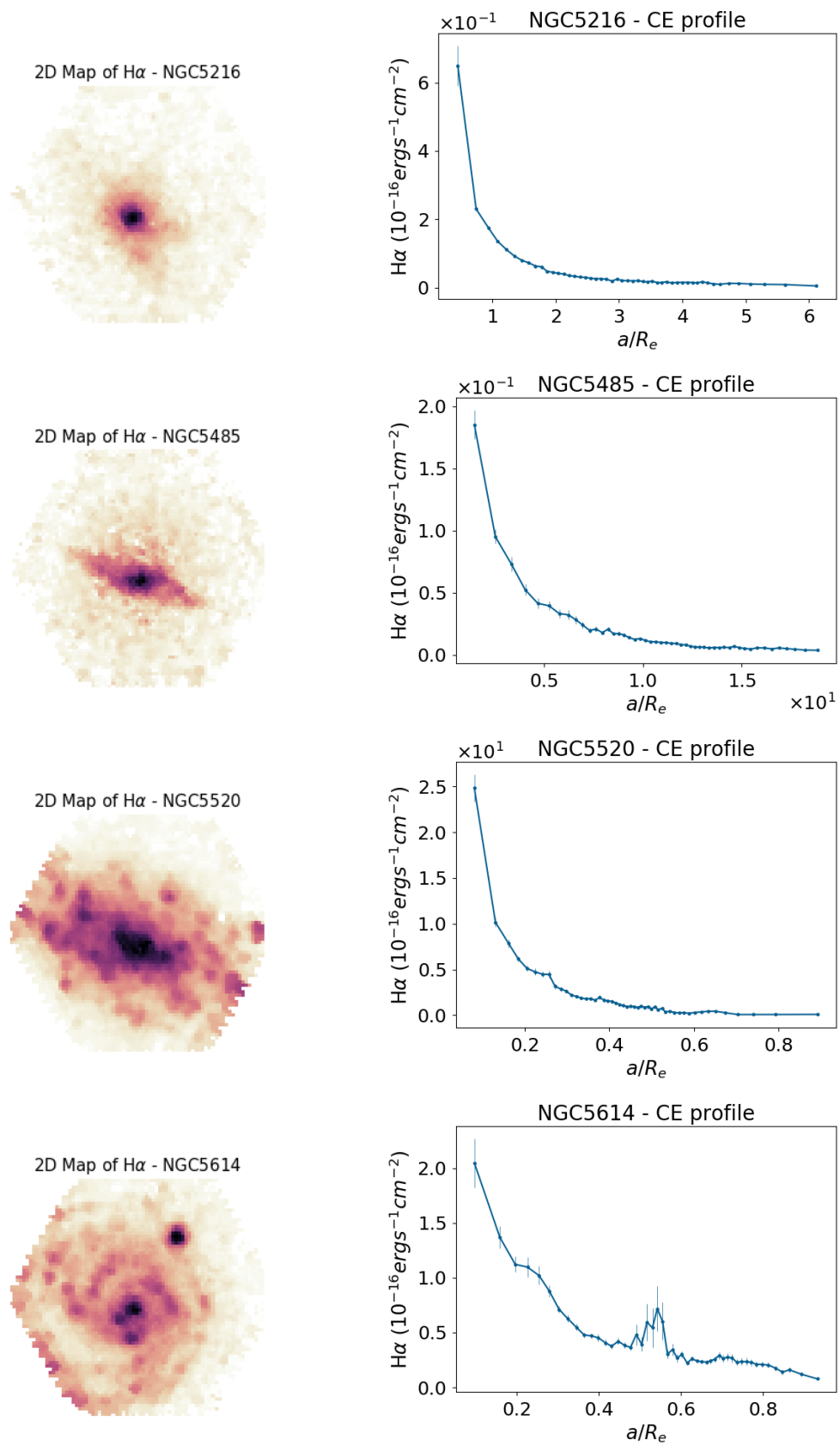


Figura A.4: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CE - cont.

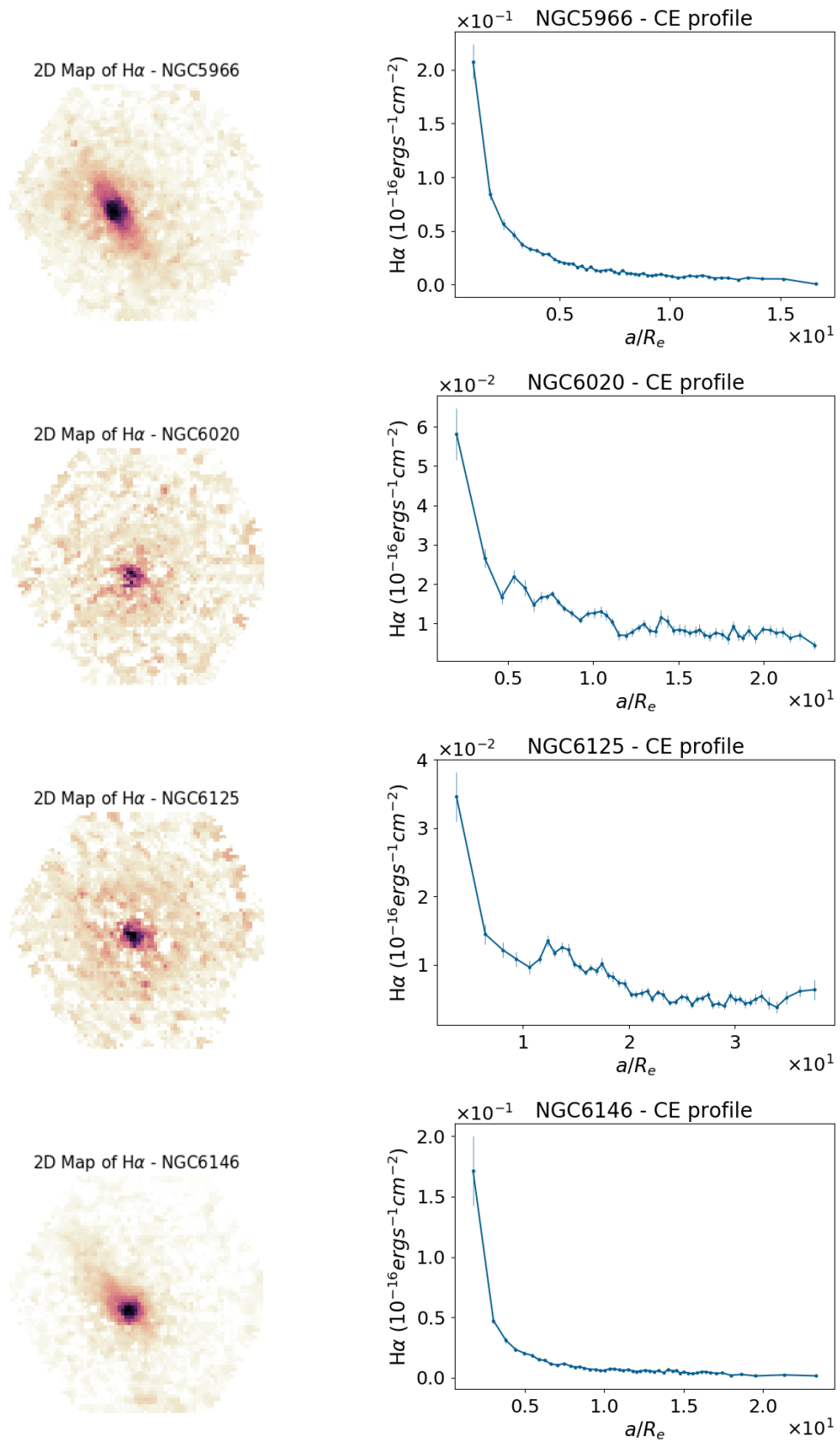
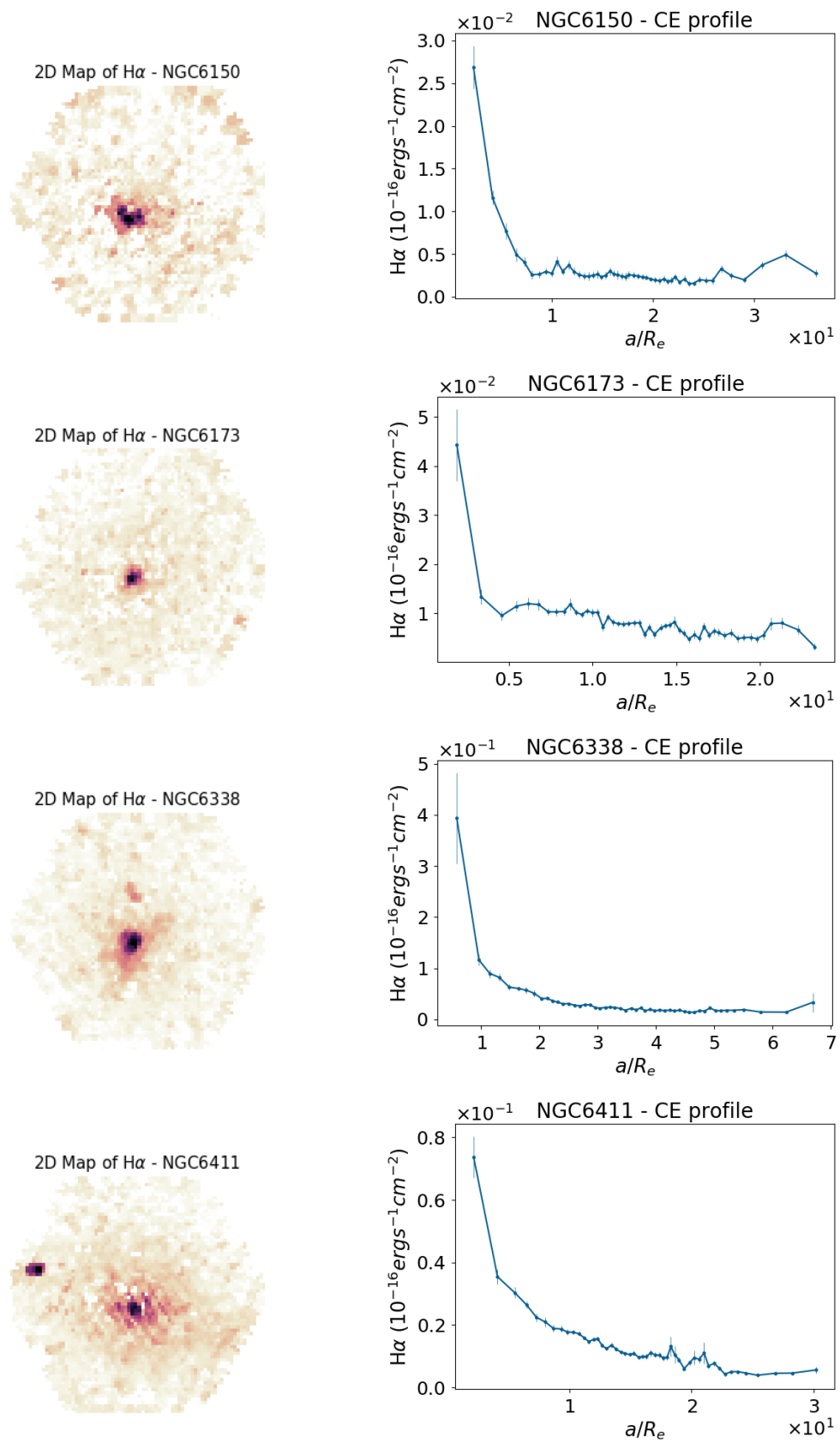


Figura A.5: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CE - cont.

Figura A.6: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CE - cont.

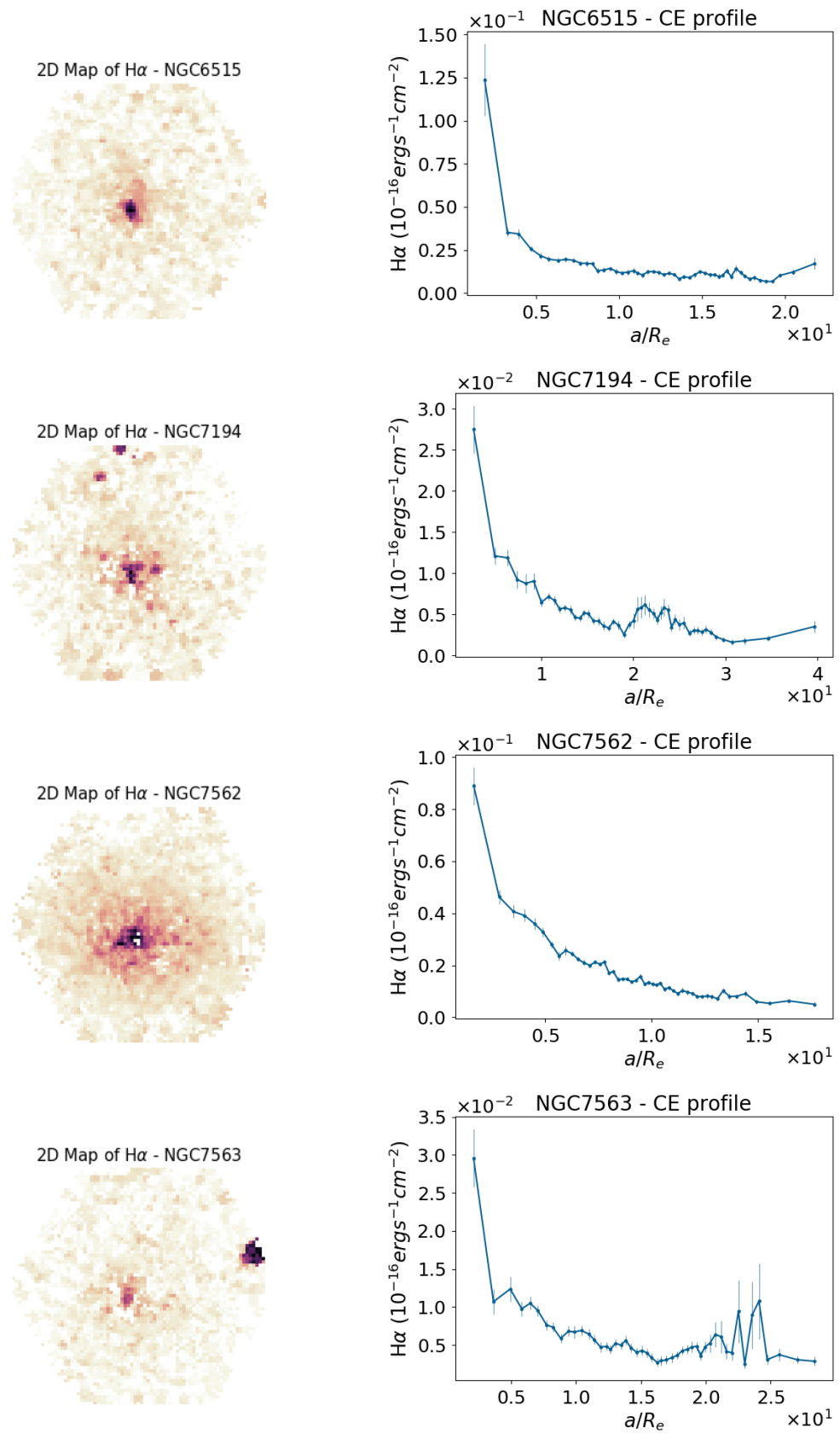


Figura A.7: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CE - cont.

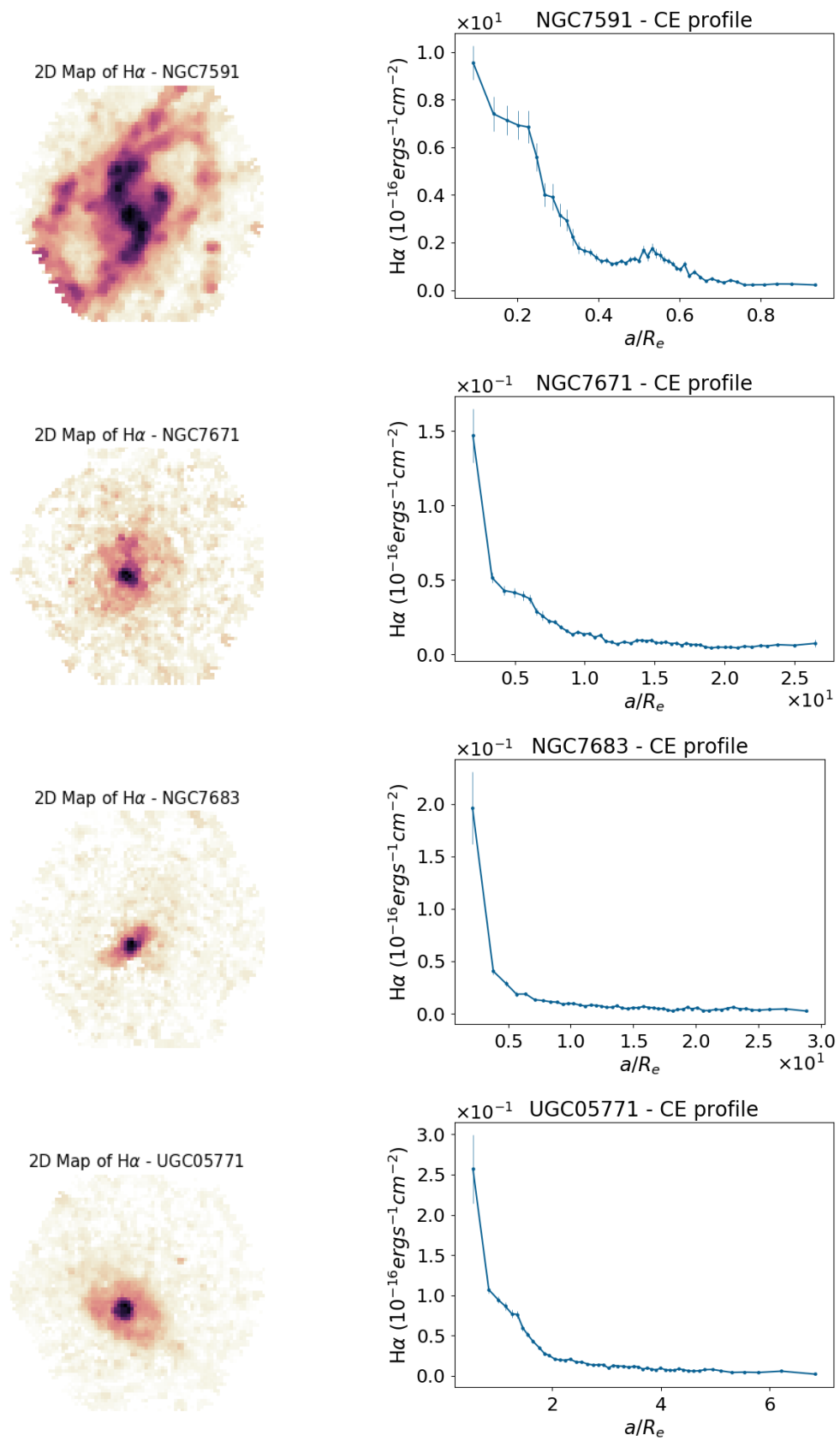


Figura A.8: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CE - cont.



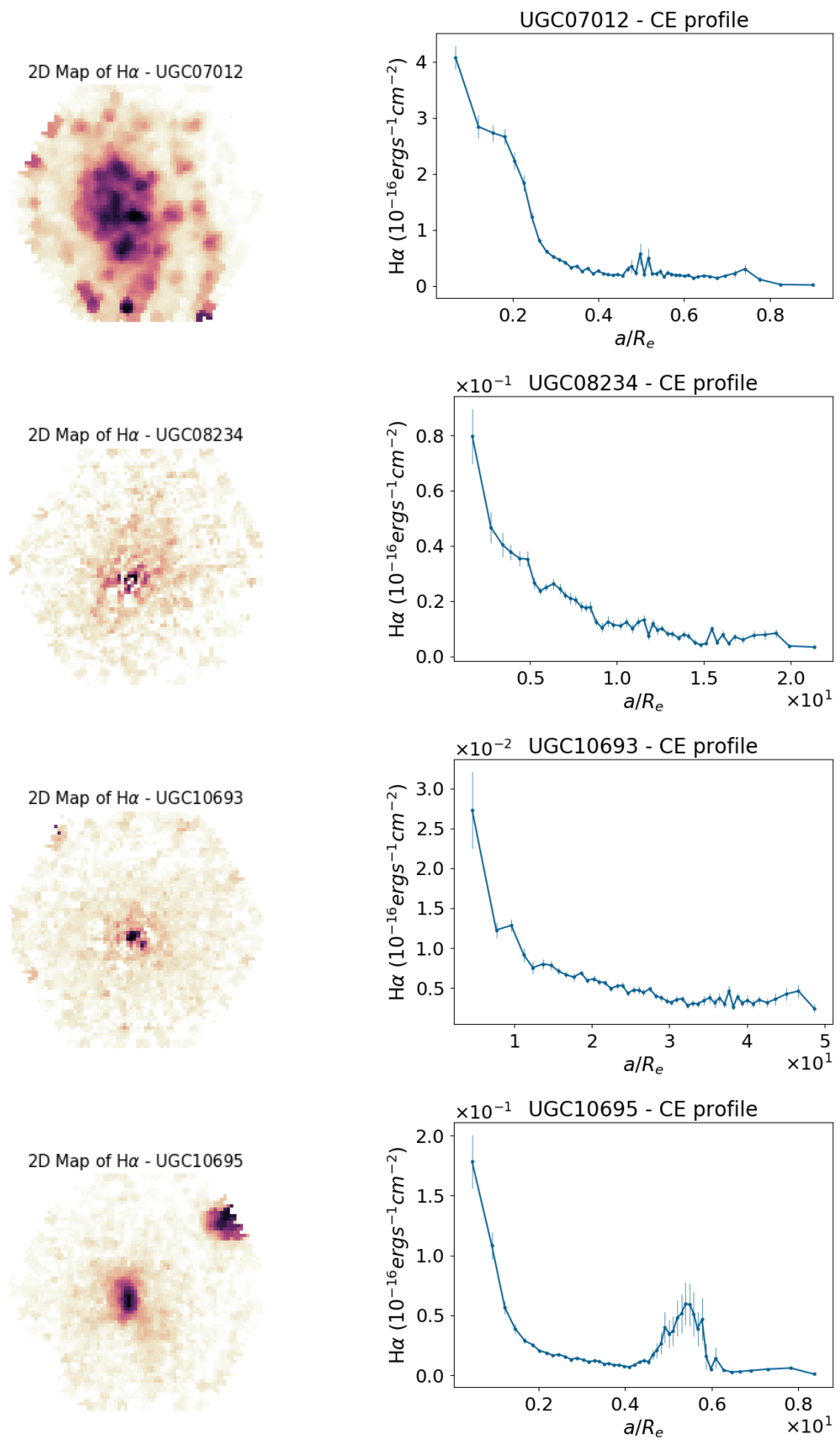


Figura A.9: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CE - cont.

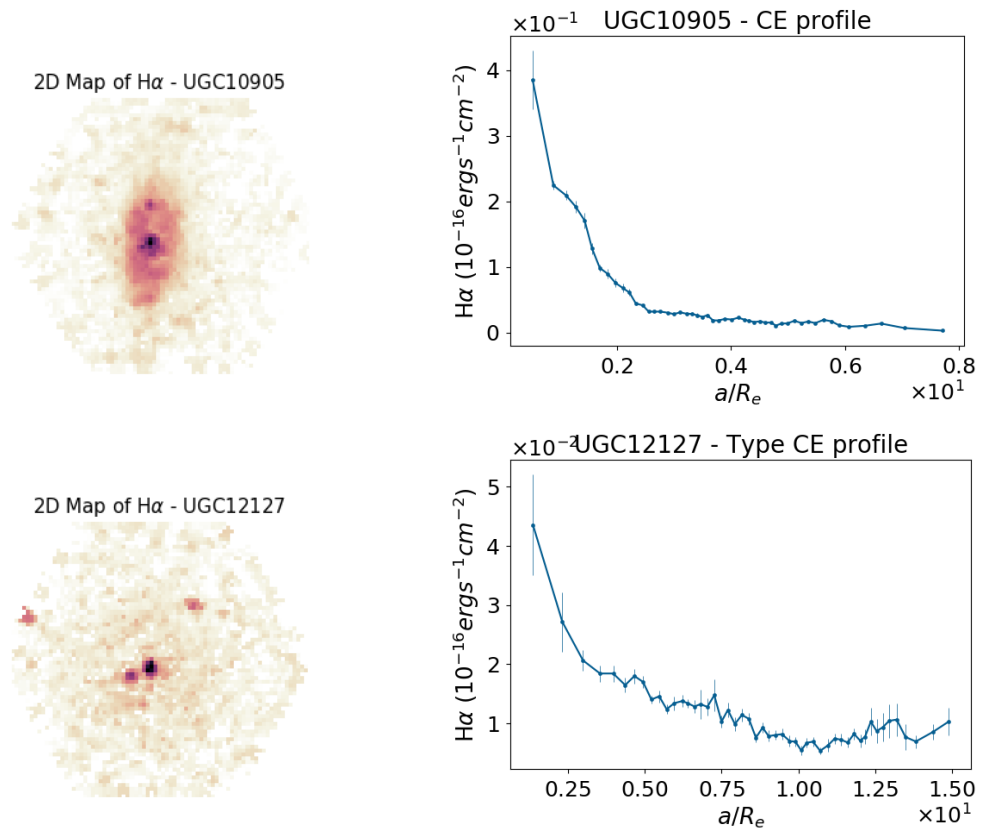


Figura A.10: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CE - cont.

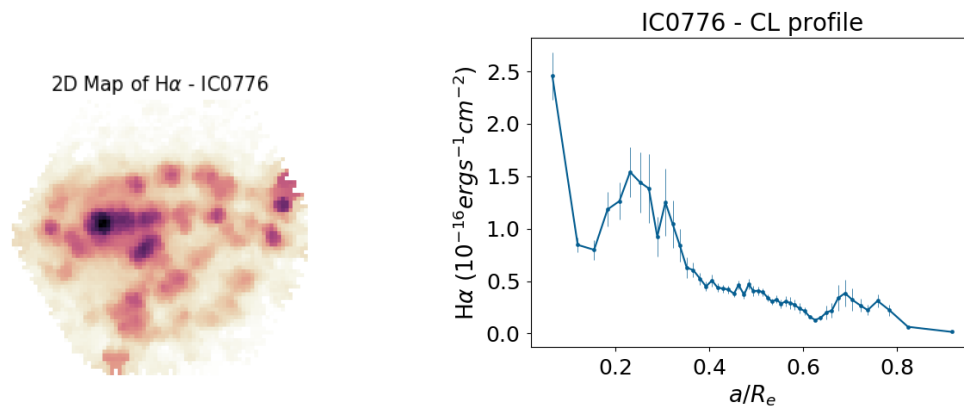


Figura A.11: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CL, para as galáxias da amostra.

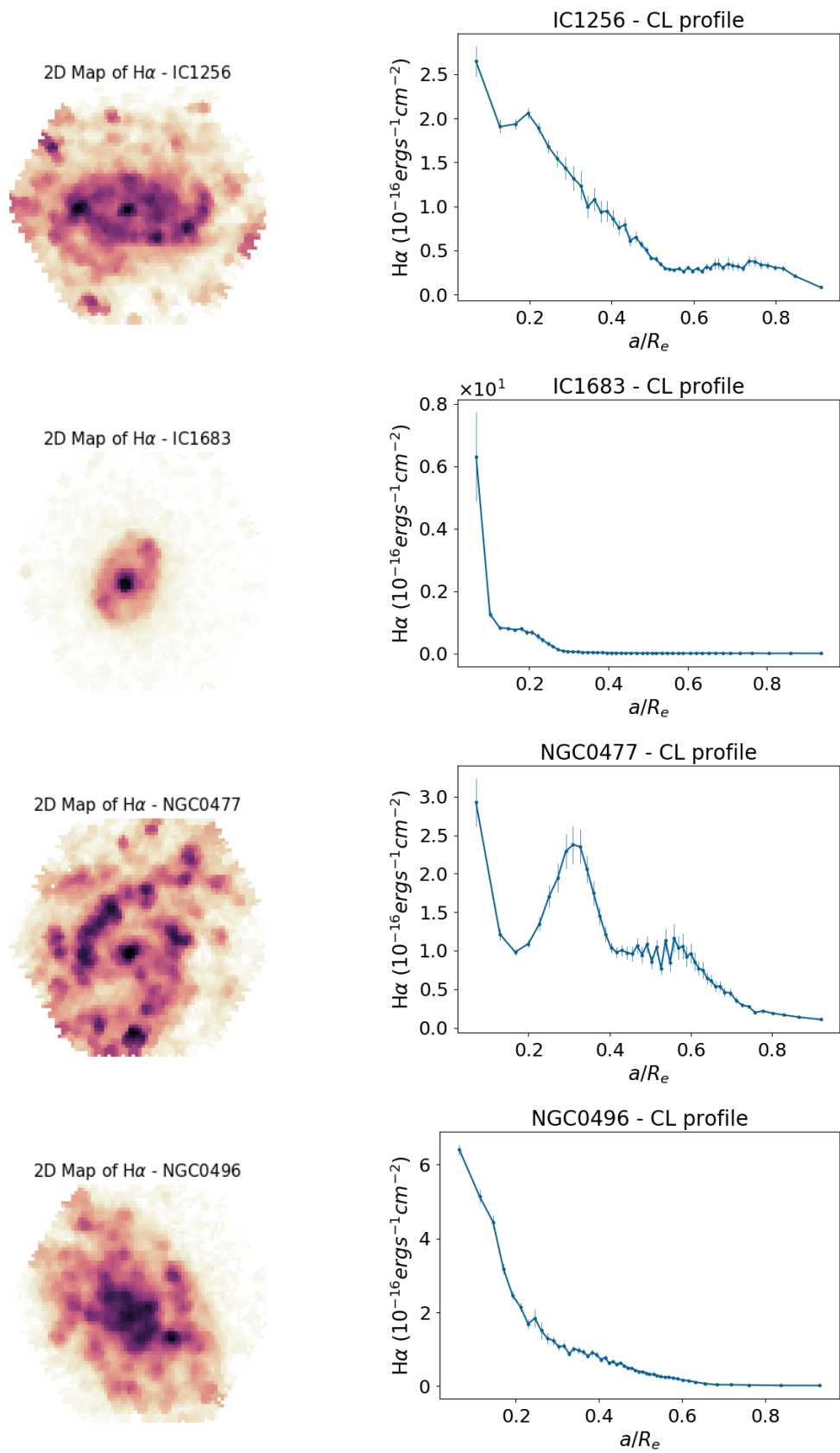
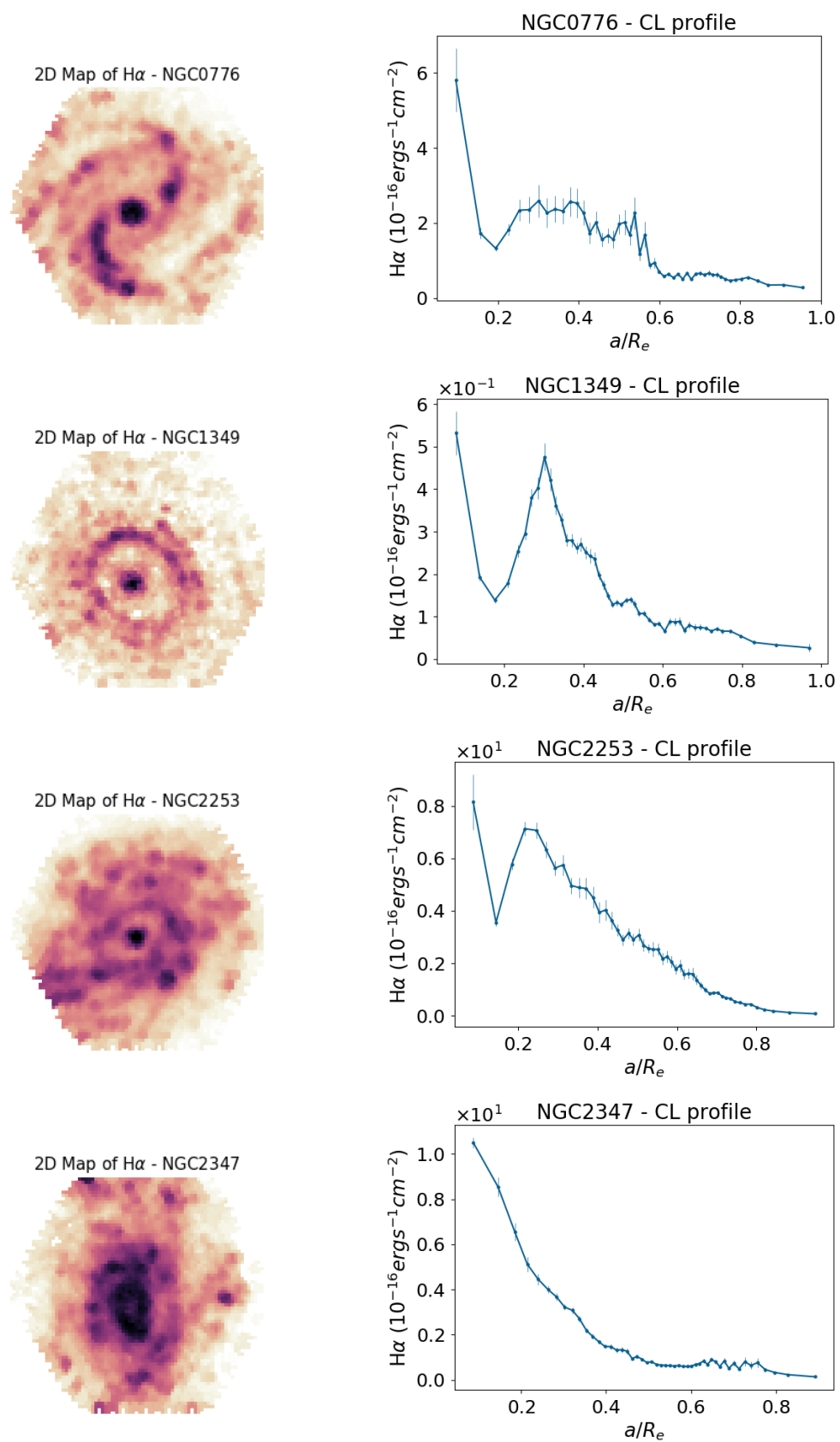


Figura A.12: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CL - cont.

Figura A.13: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CL - cont.

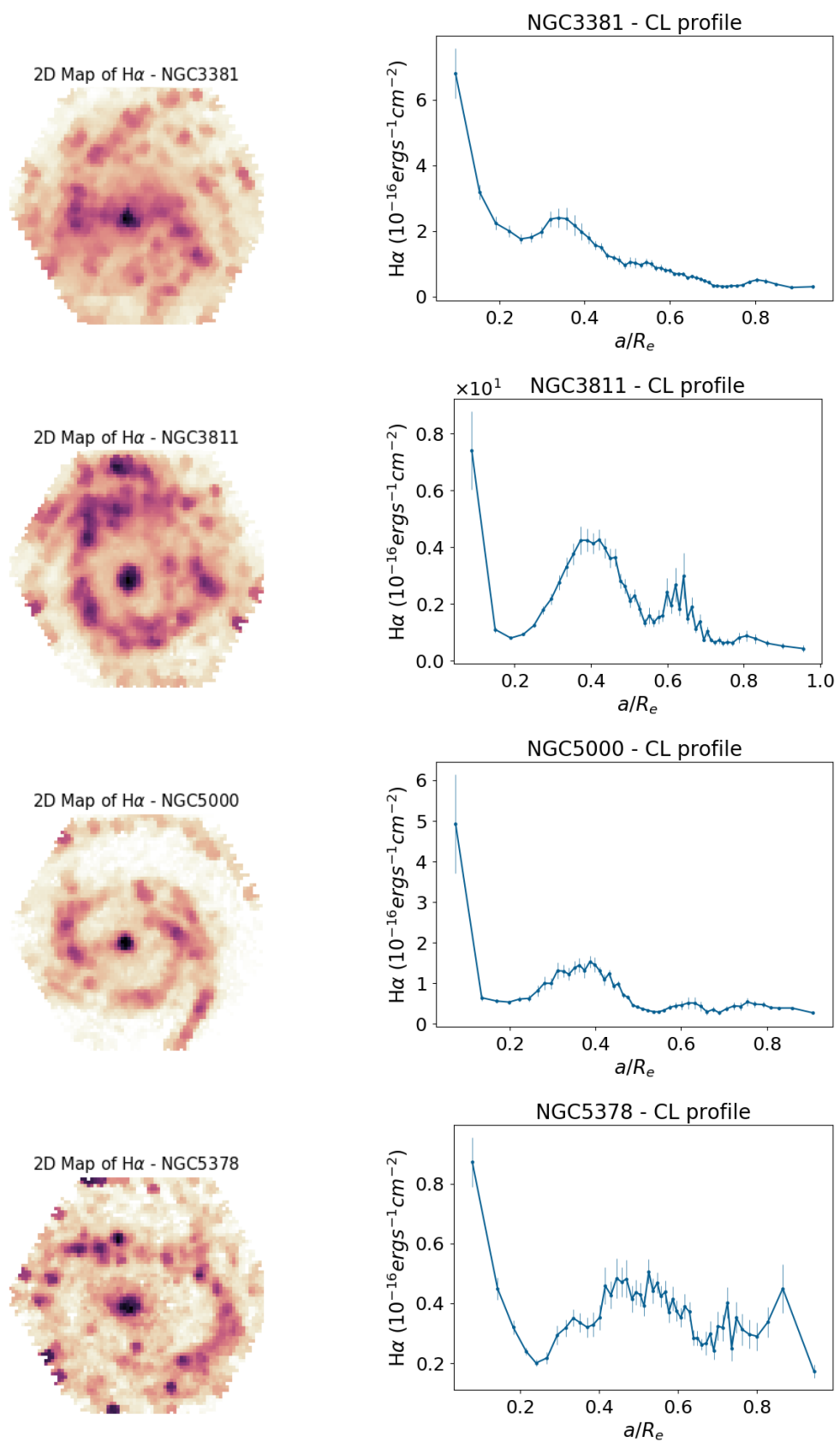
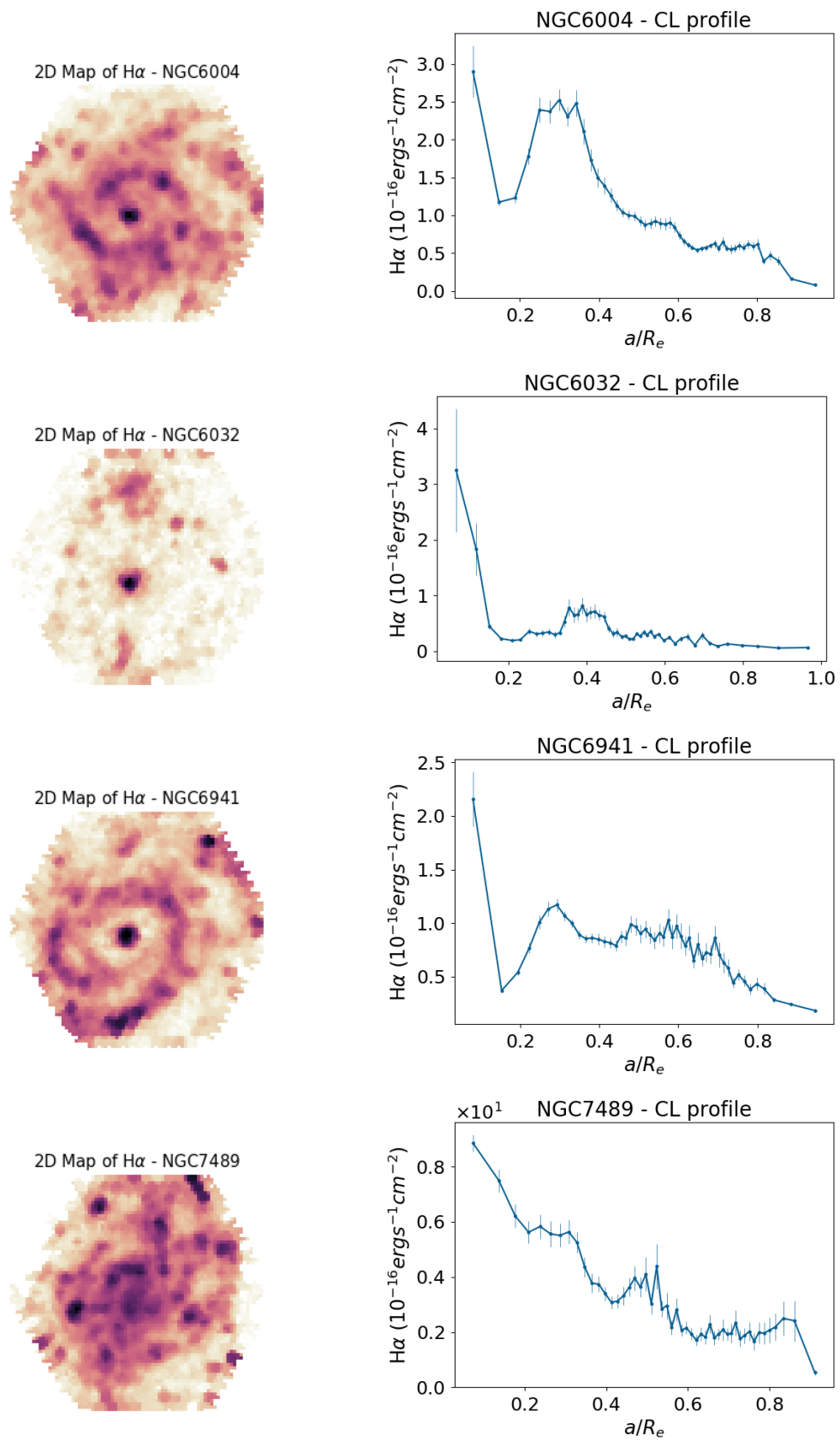


Figura A.14: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CL - cont.

Figura A.15: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CL - cont.

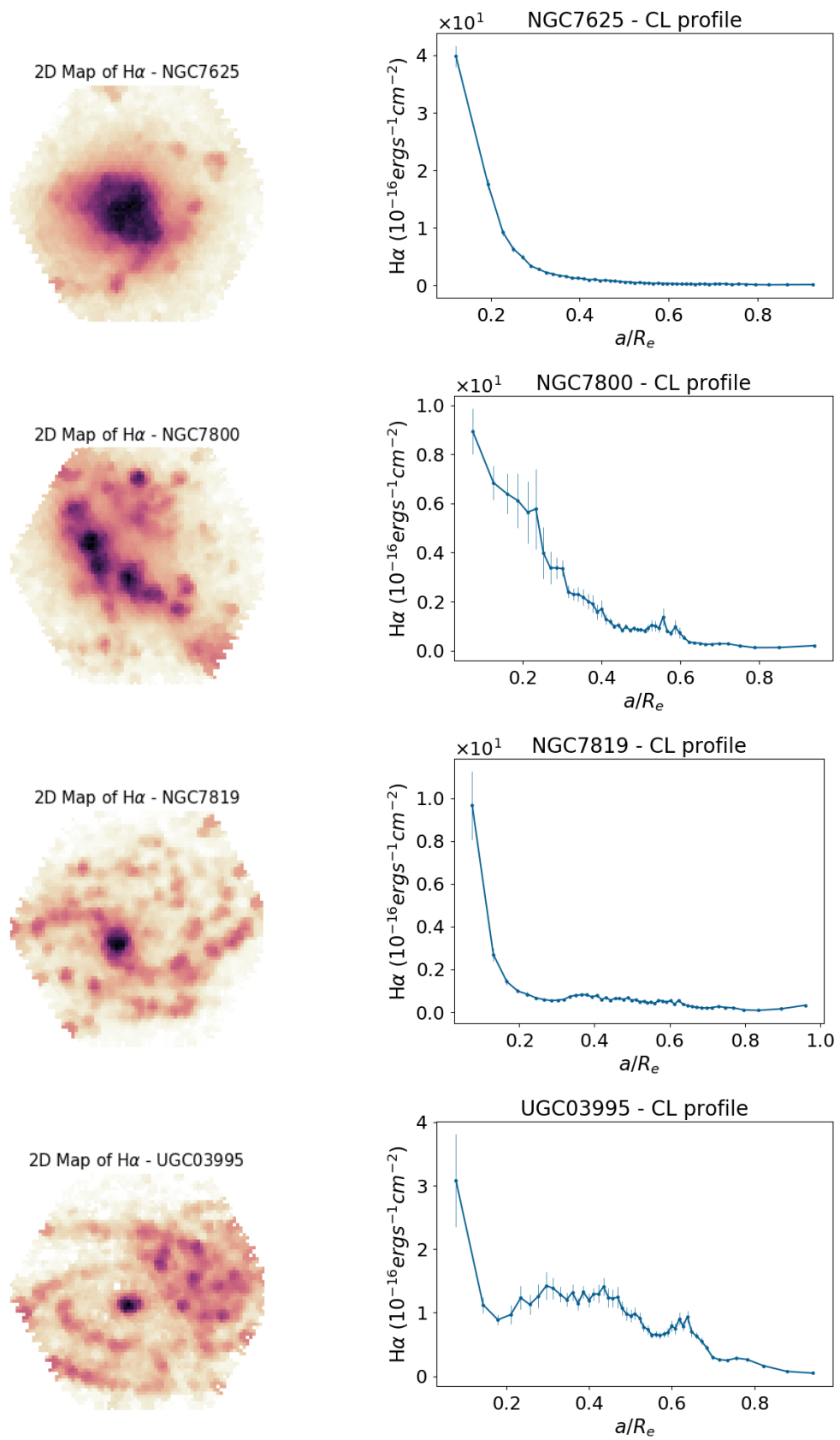
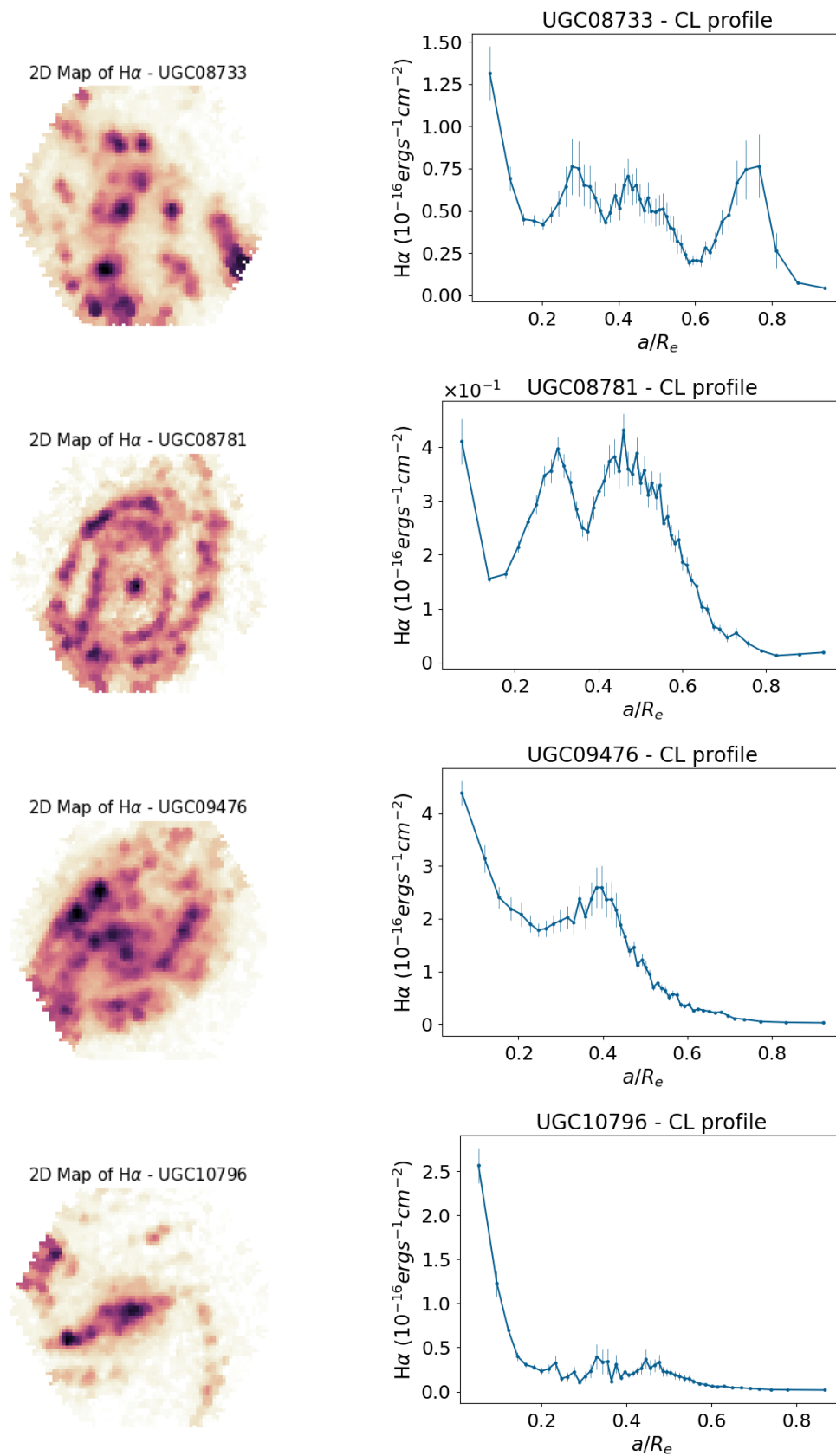


Figura A.16: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CL - cont.

Figura A.17: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo CL - cont.



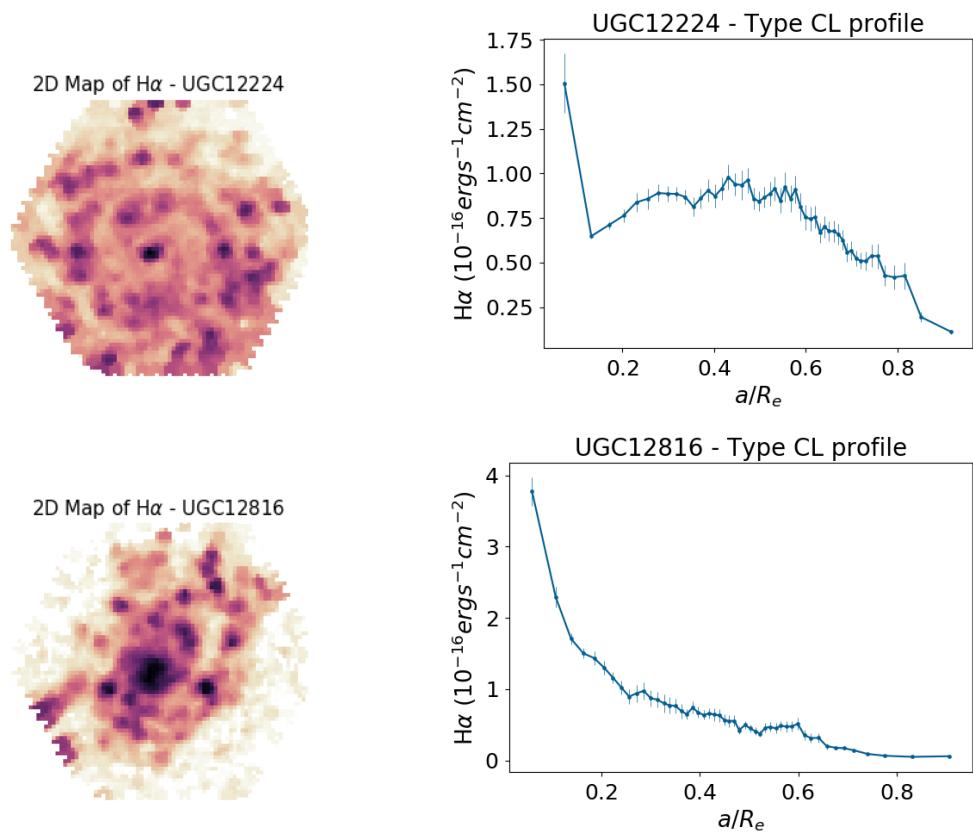


Figura A.18: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo CL - cont.

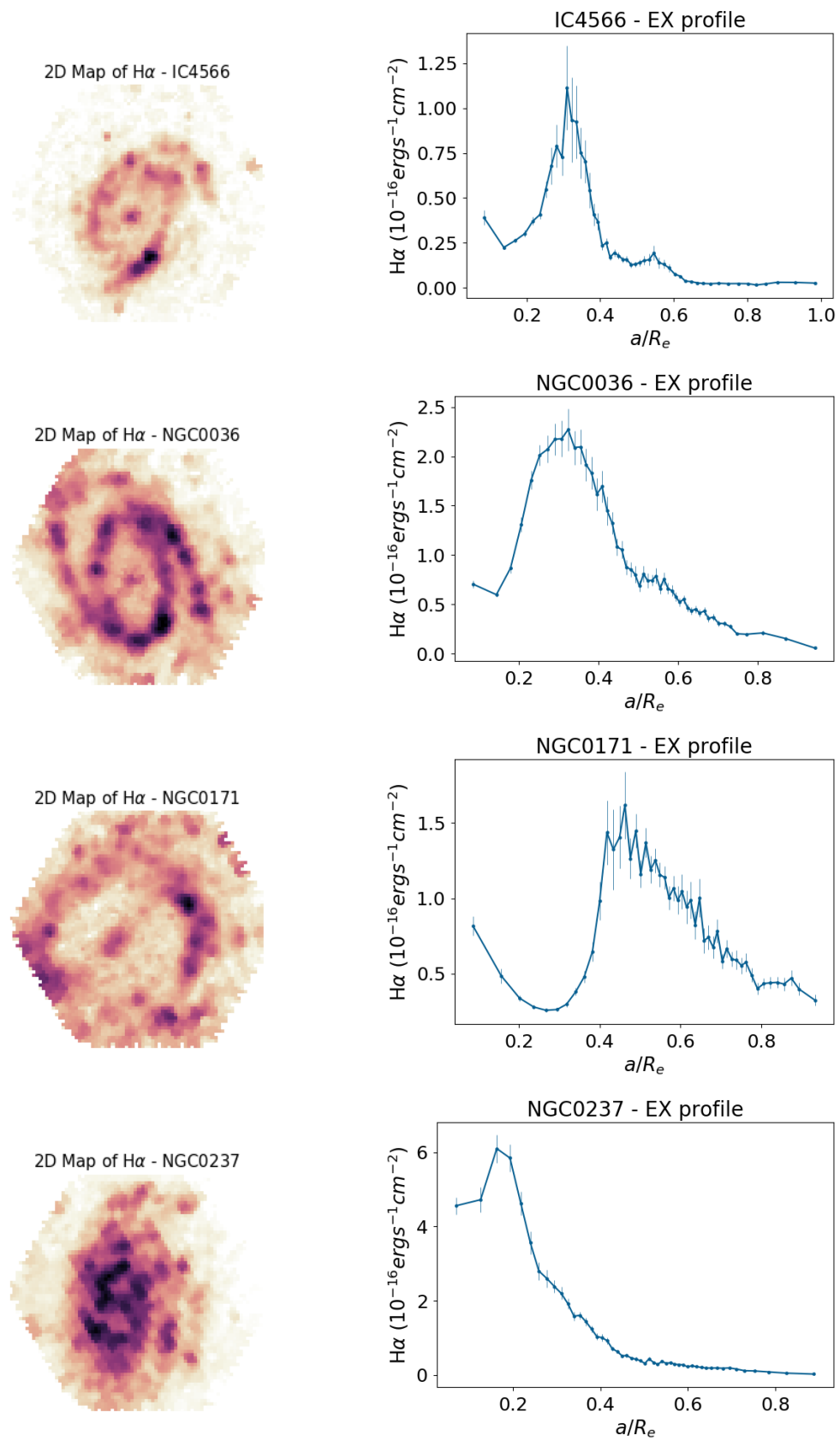


Figura A.19: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo EX, para as galáxias da amostra.

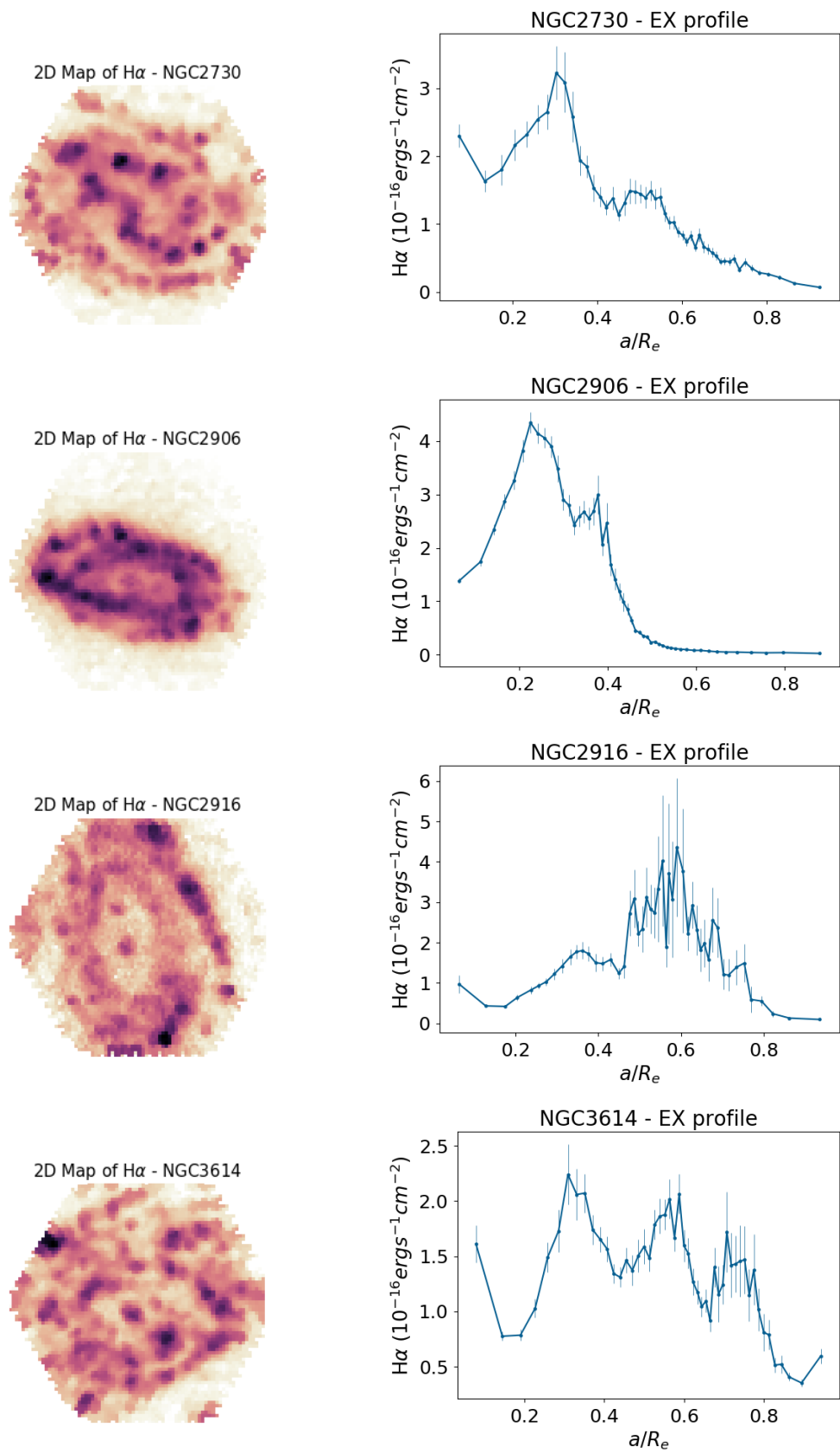
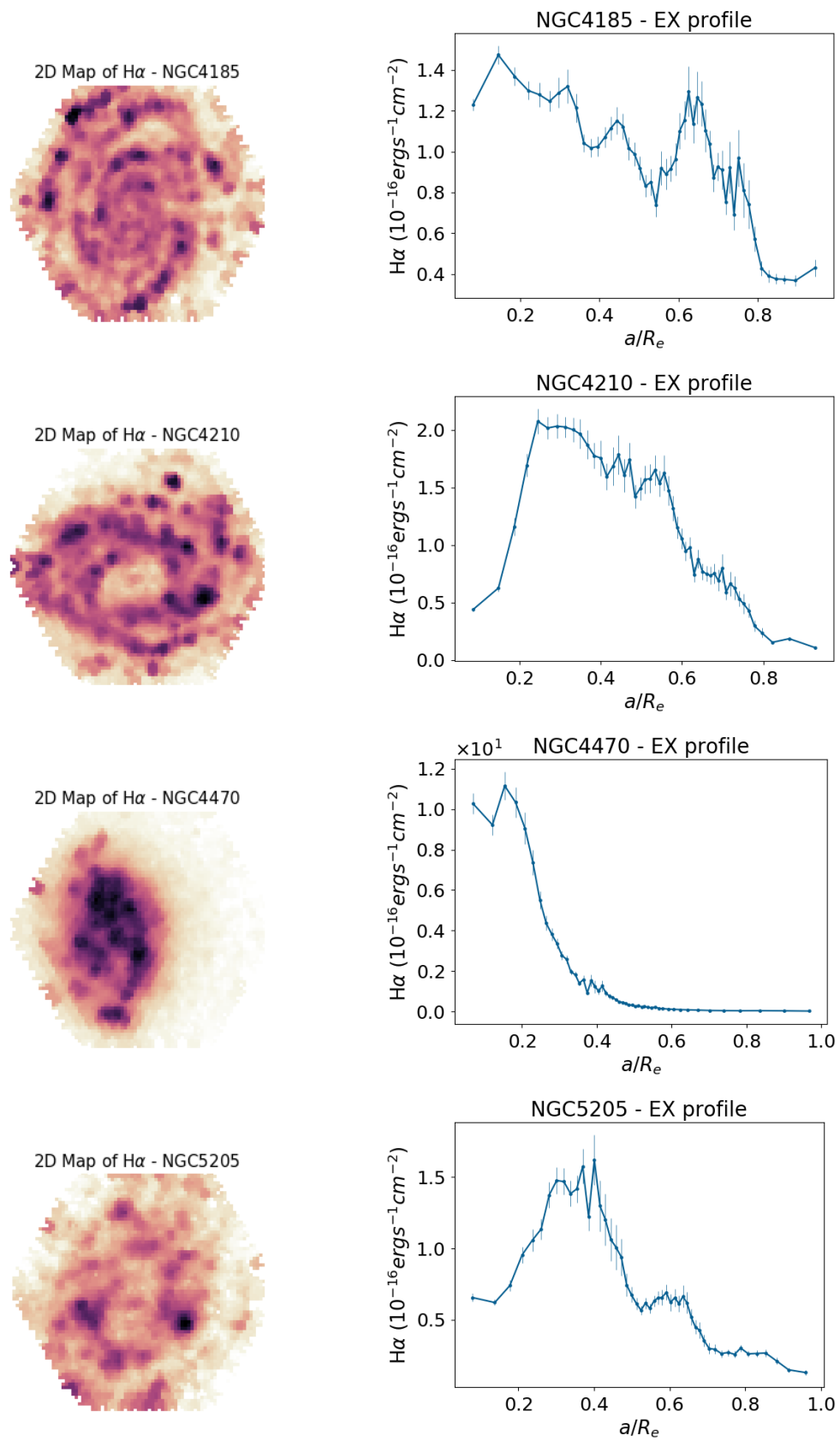


Figura A.20: Imagens e perfis de H $\alpha$  tipo EX - cont.

Figura A.21: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo EX - cont.

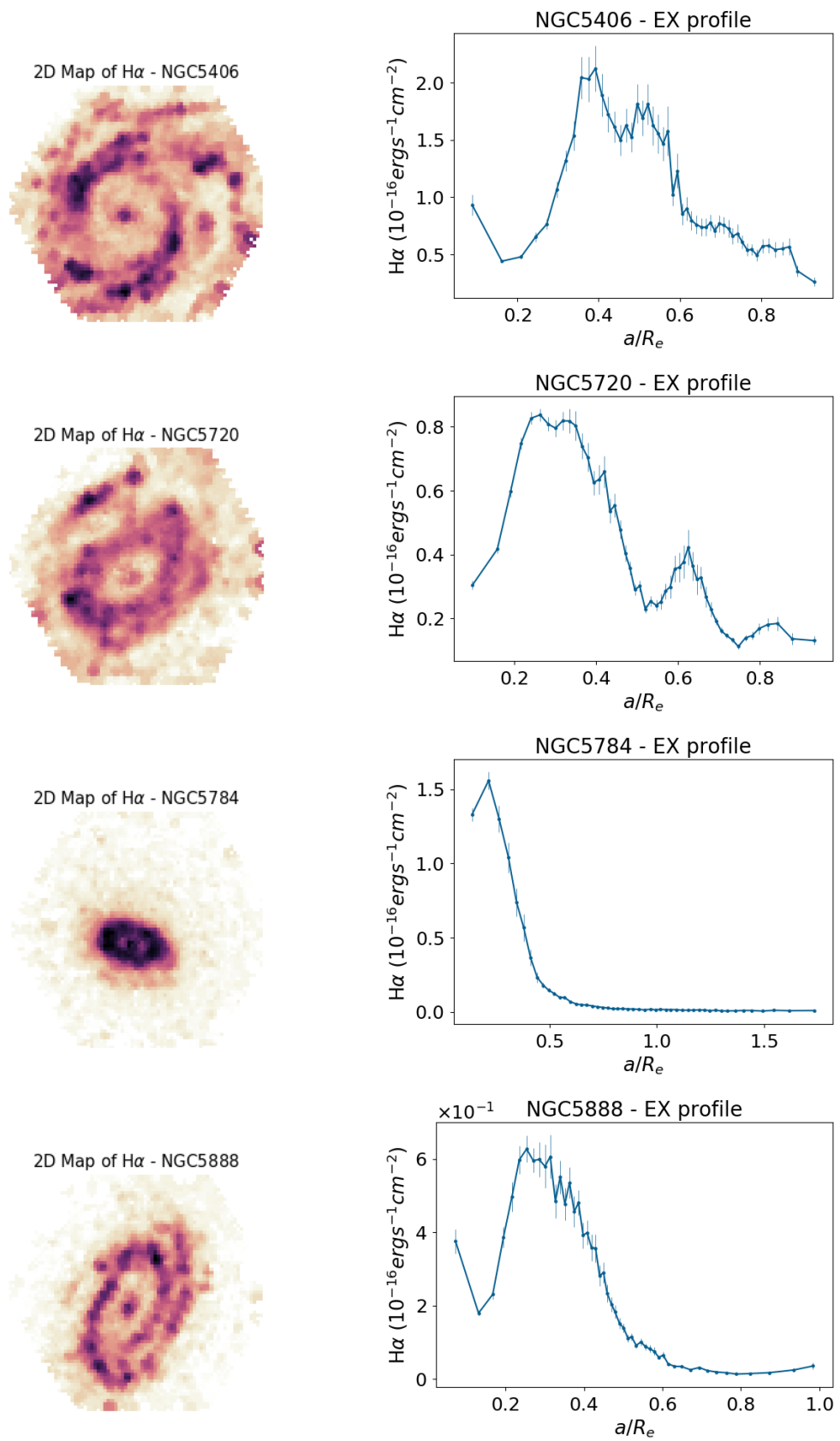
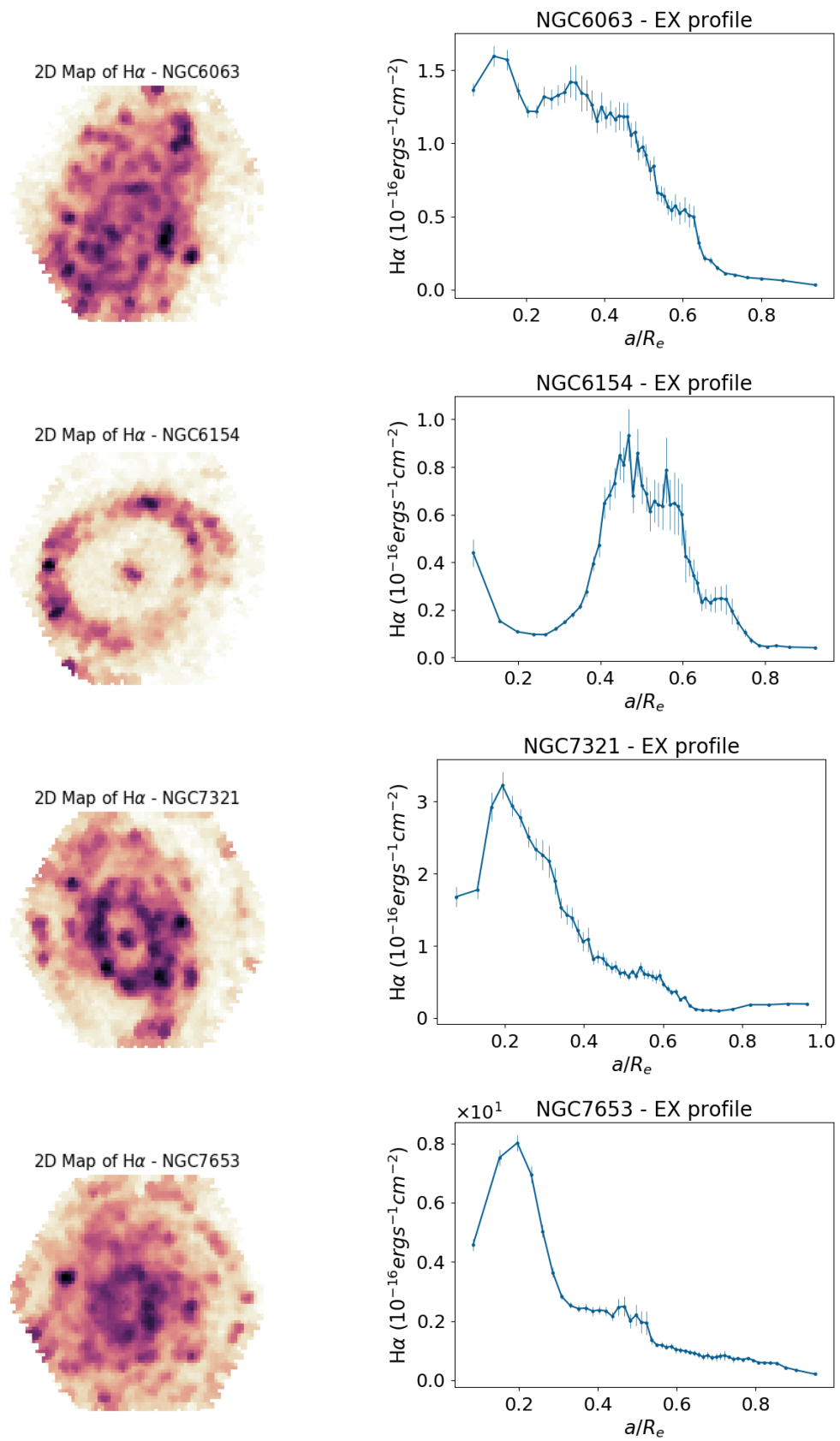


Figura A.22: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo EX - cont.

Figura A.23: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo EX - cont.

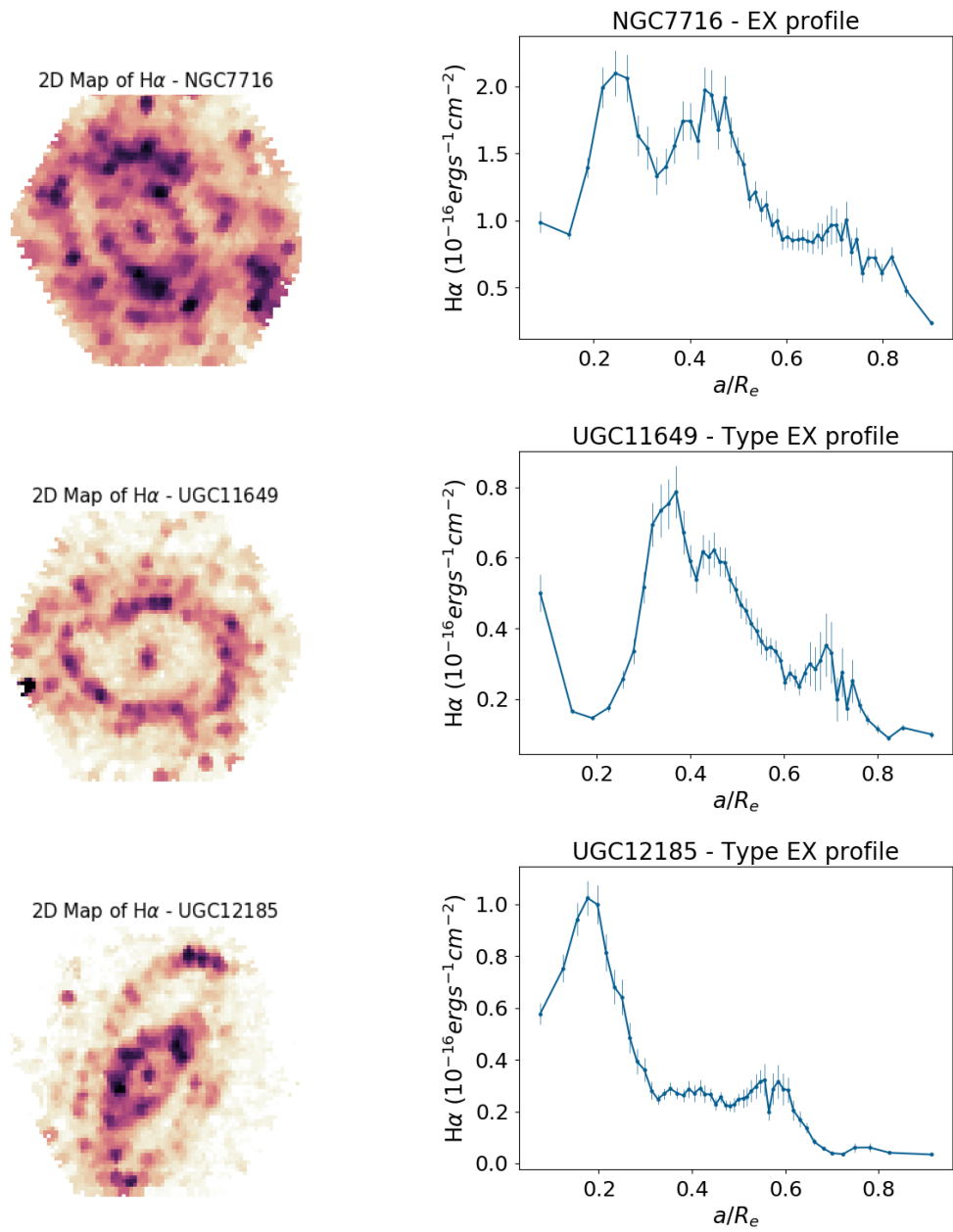


Figura A.24: Imagens e perfis de  $H\alpha$  tipo EX - cont.





## Tabelas de Propriedades

*Tabela B.1* - Propriedades derivadas para a amostra de galáxias

Nome	Classe Morf.	Perfil	SFR( $M_{\odot}/year$ )	$Cr$	$Ce(H\alpha)$	$Cc(H\alpha)$
IC0776	S_late	CL	-0.48	1.95	0.55	0.20
IC1256	S_early	CL	0.23	2.19	0.57	0.22
IC1683	S_early	CL	0.54	2.59	0.30	0.77
IC4566	S_early	EX	0.15	2.24	0.63	0.08
NGC0001	S_late	CE	0.65	03.04	0.52	0.40
NGC0036	S_early	EX	0.54	2.49	0.72	0.05
NGC0171	S_early	EX	0.04	1.98	0.81	0.04
NGC0237	S_late	EX	0.41	2.42	0.55	0.33
NGC0477	S_late	CL	0.49	2.15	0.69	0.11
NGC0496	S_late	CL	0.66	02.03	0.47	0.43
NGC0499	E_S0	CE	1.22	2.96	0.65	0.37
NGC0774	E_S0	CE	-0.91	03.01	0.51	0.53
NGC0776	S_early	CL	0.62	2.10	0.66	0.13
NGC0810	E_S0	CE	-0.44	2.98	0.45	0.51
NGC1056	S_early	CE	0.10	3.17	0.37	0.50
NGC1349	E_S0	CL	0.08	2.59	0.71	0.10
NGC1645	E_S0	CE	-0.28	3.23	0.86	0.15
NGC2253	S_late	CL	0.49	2.14	0.66	0.13
NGC2347	S_late	CL	0.54	2.57	0.58	0.30
NGC2730	S_late	EX	0.23	1.88	0.62	0.11
NGC2880	E_S0	CE	-2.27	3.26	0.81	0.17
NGC2906	S_late	EX	-0.10	02.08	0.64	0.17
NGC2916	S_late	EX	0.35	2.16	0.87	0.02
NGC3106	S_early	CE	0.22	03.06	0.84	0.12
NGC3381	S_late	CL	-0.41	02.03	0.59	0.20
NGC3614	S_late	EX	-0.25	2.18	0.77	0.04
NGC3811	S_late	CL	0.35	2.14	0.76	0.09
NGC4003	E_S0	CE	0.25	2.77	0.24	0.60
NGC4185	S_late	EX	0.05	1.96	0.77	0.08
NGC4210	S_early	EX	-0.20	1.87	0.73	0.03

Continua na próxima página...

Tabela B.1 - Continuação

Nome	Classe Morf.	Perfil	SFR	$C_r$	$C_e(H\alpha)$	$C_c(H\alpha)$
NGC4470	S_late	EX	-0.01	02.01	0.51	0.43
NGC4874	E_S0	CE	-0.76	2.72	0.76	0.13
NGC5000	S_late	CL	0.37	2.19	0.70	0.17
NGC5205	S_late	EX	-0.81	2.42	0.74	0.06
NGC5216	E_S0	CE	-1.24	2.95	0.43	0.52
NGC5378	S_early	CL	-0.62	2.42	0.86	0.09
NGC5406	S_early	EX	0.44	2.31	0.79	0.03
NGC5485	E_S0	CE	-1.60	2.79	0.50	0.38
NGC5520	S_late	CE	-0.07	03.03	0.52	0.45
NGC5614	S_early	CE	0.20	03.05	0.71	0.19
NGC5720	S_late	EX	0.38	2.36	0.73	0.06
NGC5784	E_S0	EX	0.21	3.36	0.36	0.73
NGC5888	S_early	EX	0.40	02.07	0.69	0.08
NGC5966	E_S0	CE	-0.75	2.83	0.59	0.43
NGC6004	S_late	CL	0.21	1.97	0.61	0.10
NGC6020	E_S0	CE	-1.26	03.03	0.88	0.16
NGC6032	S_late	CL	-0.06	1.96	0.64	0.27
NGC6063	S_late	EX	-0.27	1.89	0.74	0.14
NGC6125	E_S0	CE	-1.27	3.19	0.80	0.14
NGC6146	E_S0	CE	-0.10	3.36	0.50	0.47
NGC6150	E_S0	CE	-1.01	2.91	01.01	0.33
NGC6154	S_early	EX	0.14	2.27	0.83	0.03
NGC6173	E_S0	CE	0.29	3.15	0.87	0.15
NGC6338	E_S0	CE	-0.31	2.81	0.58	0.37
NGC6411	E_S0	CE	-1.21	3.00	0.76	0.22
NGC6515	E_S0	CE	-0.93	3.13	0.78	0.26
NGC6941	S_early	CL	0.47	2.12	0.80	0.07
NGC7194	E_S0	CE	-0.46	3.27	0.88	0.24
NGC7321	S_late	EX	0.74	2.39	0.63	0.18
NGC7489	S_late	CL	01.04	2.28	0.66	0.15
NGC7562	E_S0	CE	-1.14	03.07	0.75	0.21
NGC7563	S_early	CE	-1.42	3.52	0.93	0.20
NGC7591	S_late	CE	0.91	2.97	0.53	0.28
NGC7625	S_early	CL	0.24	2.61	0.37	0.48
NGC7653	S_early	EX	0.46	2.73	0.64	0.18
NGC7671	E_S0	CE	-1.04	3.22	0.63	0.38
NGC7683	E_S0	CE	-0.73	3.16	0.46	0.50
NGC7716	S_early	EX	-0.17	2.73	0.81	0.05
NGC7800	S_late	CL	-0.29	2.44	0.52	0.31
NGC7819	S_late	CL	0.41	2.11	0.57	0.39
UGC03995	S_early	CL	0.25	2.43	0.73	0.12
UGC05771	E_S0	CE	-0.30	3.35	0.46	0.57
UGC07012	S_late	CE	-0.10	2.72	0.48	0.45
UGC08234	E_S0	CE	-0.95	3.32	0.83	0.28

Continua na próxima página...

Tabela B.1 - Continuação

Nome	Classe Morf.	Perfil	SFR	$C_r$	$C_e(H\alpha)$	$C_c(H\alpha)$
UGC08733	S_late	CL	-0.64	2.14	0.75	0.12
UGC08781	S_early	CL	0.29	2.47	0.89	0.06
UGC09476	S_late	CL	0.04	1.84	0.65	0.19
UGC10693	E_S0	CE	1.65	3.28	0.77	0.19
UGC10695	E_S0	CE	-0.17	2.80	0.88	0.31
UGC10796	S_late	CL	-0.50	2.41	0.63	0.42
UGC10905	E_S0	CE	0.61	3.47	0.48	0.52
UGC11649	S_early	EX	-0.35	2.12	0.79	0.04
UGC12127	E_S0	CE	-0.37	03.05	0.80	0.15
UGC12185	S_early	EX	0.06	2.83	0.68	0.25
UGC12224	S_late	CL	-0.10	1.84	0.74	0.09
UGC12816	S_late	CL	0.21	2.37	0.63	0.31