Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Programa de Pós-Graduação em Astronomia
Observatório do Valongo

Morfologia e Magnitudes Absolutas de QSOs – um novo olhar sobre as galáxias hospedeiras

Aluno: Bruno Coelho

Orientador: Prof. Dr. Alexandre H. Andrei

Co-orientadora: Dra. Sonia Antón

Rio de Janeiro - 2017

Bruno Coelho

Morfologia e Magnitudes Absolutas de QSOs – um novo olhar sobre as galáxias hospedeiras

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia da Universidade Federal do Rio de Janeiro para a obtenção do grau de Doutor em Astronomia.

Rio de Janeiro – RJ, Brasil

2017

CIP - Catalogação na Publicação

C672m

Coelho, Bruno
Morfologia e Magnitudes Absolutas de QSOs -- um novo olhar sobre as galáxias hospedeiras / Bruno Coelho. -- Rio de Janeiro, 2017.
144 f.

Orientador: Alexandre H. Andrei.
Coorientadora: Sonia Antón.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Programa de Pós Graduação em Astronomia, 2017.

1. Astronomia Extragaláctica. 2. Quasares. 3. Galáxias. 4. AGNs. 5. magnitudes absolutas. I. Andrei, Alexandre H., orient. II. Antón, Sonia, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ao "tio" Chico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda, e apoio de várias pessoas às quais quero apresentar a minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, Alexandre Andrei e Sonia Antón. Obrigado por toda a dedicação e tempo investido, pelo conhecimento partilhado, pela paciência, pelo apoio, pelos conselhos e dicas, pelas conversas, pela amizade, por me mostrarem o caminho, por tudo, e por mais alguma coisa que não me esteja a lembrar agora, muito obrigado.

Agradeço ainda à CAPES o apoio financeiro, sem o qual nada disto seria possível.

Agradeço muito aos meus pais incríveis, que apesar de longe estão sempre perto. Muito obrigado aos meus avós, e à tia Maria Laura.

Agradeço a toda a comunidade do Observatório do Valongo, professores, pós-doutorados, a todos os funcionários e auxiliares, por criarem um ambiente de trabalho incrível, e por estarem sempre dispostos a ajudar. Obrigado a todos os colegas da pós, em particular aos colegas de sala Raquel Nascimento, João, Elisson, Karolina, pela partilha do espaço, pelas conversas, discussões interessantes, pela ajuda e pela amizade.

Obrigado ainda ao Edgar, Luis, Donavan, Hélio e ao Adrian, pela amizade dentro e principalmente fora do observatório, obrigado também à Luciana pela amizade.

Muito obrigado à D. Ana Luiza, Gracinha, e aos seus filhos, por me receberem e acolherem em 2013, quando cheguei ao Rio pela primeira vez. Também agradeço à D. Paula e ao Wolf, pelo acolhimento e amizade nos últimos anos.

Obrigado a todos os amigos da Capoeira, obrigado pela partilha, trocas, companheirismo e principalmente pela amizade de vocês. Obrigado Maíra e Javi, pela partilha de outros espaços também, "tamo junto".

Finalmente, por teres entrado na minha vida, pelo tanto que me acrescentaste, pelo teu carinho e afeto, muito obrigado Bruna.

"O que vi do universo
até hoje foi pouco
mas, se penso em quanto meço,
posso dizer que foi muito."

Ferreira Gullar

RESUMO

Morfologia e Magnitudes Absolutas de QSOs – um novo olhar sobre as galáxias hospedeiras

Bruno Coelho
Alexandre H. Andrei & Sonia Antón
Rio de Janeiro, 10 de Março de 2017.

Os QSOs são núcleos ativos de galáxias. A luminosidade tão grande que pode suplantar a da galáxia hospedeira, torna a observação desta extremamente difícil ou até impossível. Geralmente eles surgem nas imagens como quasi-pontuais, o que aliado às enormes distâncias, faz deles objetos excelentes para a materialização de sistemas de referencia. A missão Gaia da Agência Espacial Europeia, fornecerá astrometria de uma precisão sem precedentes ($\sim$ 20 μas). O principal objetivo da missão é o mapeamento da Galáxia, mas espera-se que observe $\sim$ 500 000 QSOs. Cerca de 10 000 serão usados na definição do referencial astrométrico fundamental, relativamente ao qual serão remetidas as medições astrométricas de Gaia. A presença da hospedeira pode aumentar a incerteza nas posições, o que é um problema para uma missão como Gaia. Para minimizar isto, foram criados índices morfológicos SHARP, SROUND e GROUND, que permitem comparar a PSF do QSO à PSF estelar média.

Obtivemos índices morfológicos para os QSOs do Sloan Digital Sky Survey-DR7 (SDSS) e em paralelo para os novos QSOs do Large Quasar Astrometric Catalog - 3. Exploramos relações entre os índices e outras quantidades como, *redshift*, magnitudes absolutas ou índices espectrais, para tentar obter informações sobre as hospedeiras. Os resultados mostram que os índices percebem componentes do sistema QSO+hospedeira. Destacamos perturbações associadas à emissão ultravioleta, mais importantes para z$>$ 1.5, possivelmente de populações estelares jovens e/ou Lyα *blobs*. Para uma sub-amostra de QSOs (classificados como extensos no SDSS-DR7) medimos a elipticidade e o índice de Sérsic. Fizemos ainda uma avaliação morfológica das hospedeiras por inspeção visual. Encontramos uma fração considerável de hospedeiras com morfologias distorcidas resultado de interações/fusões. Há uma predominância de hospedeiras espirais/disco face a elípticas.

Finalmente, apresentamos uma nova aproximação para calcular magnitudes absolutas de QSOs, que se destaca pelo uso da biblioteca de espectros sintéticos Gaia, que contempla diferentes índices espectrais e intensidades das linhas de emissão. Para ter uma abordagem

mais completa, incluímos a contribuição das linhas de emissão, correções para a floresta de Lyα e para a poeira da hospedeira. Comparando as nossas magnitudes absolutas com outros métodos na literatura, vemos que são mais brilhantes em até 2 mag.

Palavras-chaves: galáxias: quasares - galáxias: activas - galáxias: alto *redshift*

ABSTRACT

Morphology and Abosulte magnitudes of QSOs – a new look to their host galaxies

Bruno Coelho
Alexandre H. Andrei & Sonia Antón
Rio de Janeiro, 10^{th} of March 2017.

QSOs are active galactic nuclei. The luminosity, so great that it can surpass that of the host galaxy, makes the observation of the latter extremely difficult or even impossible. Usually QSOs appear in images as point like, what, together with the enormous distances, makes them excellent objects for the materialization of reference systems. The Gaia mission from the European Space Agency will provide astrometry of unprecedented accuracy ($\sim 20\ \mu$as). The main purpose of the mission is to map the Galaxy, but it is also expected to observe $\sim 500\,000$ QSOs. Of these about 10 000 will be used in the definition of the fundamental astrometric frame, to which Gaia's astrometric measurements will be referred. The presence of the host can increase the uncertainty in the positions, which is a problem in a Gaia like mission. To minimize this, morphological indexes SHARP, SROUND and GROUND were created, that allow us to compare the PSF of the QSO to the mean stellar PSF.

We obtained morphological indexes for QSOs of the Sloan Digital Sky Survey-DR7 (SDSS) and in parallel for the new QSOs of the Large Quasar Astrometric Catalog - 3. We explored correlations between indexes and other quantities such as *redshift*, absolute magnitudes, or spectral indexes, to try to obtain information about the hosts. The results show that the indexes perceive components of the QSO+host system. We highlight perturbations associated with ultraviolet emission, being more important for z$>$ 1.5, possibly from young star populations and/or Ly$_\alpha$ *blobs*. For a subsample of QSOs (classified as extended in SDSS-DR7) we obtained ellipticity and Sérsic index values. We also performed a morphological evaluation of the hosts by visual inspection. We found a considerable fraction of hosts with distorted morphologies result of interactions/collisions. There is a predominance of spiral/disc hosts over elliptical hosts.

Finally, we present a new approach to calculate absolute magnitudes of QSOs, which innovates through the use of the Gaia library of synthetic spectra, which includes different spectral indexes and emission line intensities. Intended to be a complete approach, we

include the contribution of the emission lines, corrections to the Ly_{α} forest and to the host dust absorption. Comparing our absolute magnitudes with other methods in the literature, we see that ours are brighter up to 2 mag.

Key-words: galaxies: quasars - galaxies: active - galaxies: high-redshift

LISTA DE FIGURAS

1.1 Esquema do modelo unificado de AGNs (Urry & Padovani 1995). 3
1.2 Taxonomia dos AGNs. 3
1.3 Espectro médio de um QSO, obtido a partir de mais de 700 QSOs do Large Bright Quasar Survey (Francis et al. 1991). 5
1.4 Simulação para avaliar o efeito da presença da galáxia hospedeira, na determinação do fotocentro de um QSO (Andrei et al. 2011). 8
1.5 Exemplos de galáxias hospedeiras de quasares a baixo *resdshift* (z< 0.5) imagens obtidas com o Hubble Space Telescope. 10

2.1 Em cima – Distribuição de *redshift* dos QSOs do SDSS(DR7). Embaixo – Distribuição dos mesmos no plano do céu. 19
2.2 Histogramas dos índices morfológicos. Topo – SHARP, meio – SROUND, fundo – GROUND. 22
2.3 Distribuição do valor médio dos índices morfológicos para os filtros *ugriz* em função do *redshift* (em intervalos de 0.5). 24
2.4 Distribuição da fração de QSOs com pelo menos um índice morfológico ≥ 3 para os filtros *ugriz* em função da latitude galáctica (em intervalos de 0.5). 27
2.5 Distribuição da fração de QSOs com pelo menos um índice morfológico ≥ 3 para os filtros *ugriz* em função do *redshift* (em intervalos de 0.5). (Com e sem corte em latitude galáctica.) 30
2.6 *Surface Brightness dimming* em função do *redshift*. 33

3.1 Histograma dos índices morfológicos para os QSOs que já pertenciam ao LQAC-2 (em cima), esta amostra era dominado por objetos do SDSS-DR7. Histograma dos índices morfológicos para os novos QSOs do LQAC-3 (embaixo), este conjunto é dominado pelos QSOs do BOSS. 42

3.2 Valores médios dos índices morfológicos. Para os novos objetos do LQAC-3 em comum com o PPMXL, para os que não estão no PPMXL, e para os objetos do LQAC-2. 44
3.3 Distribuição dos valores médios dos índices morfológicos em função do *redshift*, com este em intervalos de 0.5. Para os objetos do SDSSIII/BOSS com $R < 19$. 45

4.1 O famoso diagrama *tuning fork* de Hubble, para classificação morfológica de galáxias. (Hubble, 1936) 49
4.2 Representação de perfis de intensidade para vários valores do índice de Sérsic n. (Peng et al. 2010) 50
4.3 Histogramas da elipticidade consoante os diferentes filtros do SDSS *ugriz*. 53
4.4 Histogramas do índice de Sérsic consoante os diferentes filtros do SDSS *ugriz*. 55
4.5 Imagens do SDSS resultado da combinação dos filtros g, r e i mostrando exemplos de QSOs classificados pelo SDSS como extensos, e objetos classificados como pontuais pelo SDSS. Representando diferentes elipticidades e valores de índice de Sérsic. 56
4.6 Imagens do SDSS resultado da combinação dos filtros g, r e i mostrando exemplos de QSOs classificados pelo SDSS como extensos e com $n = 0.5$. . 57

5.1 Cores observadas corrigidas da extinção Galáctica e da absorção da floresta de Ly_α, e respectivos valores modais e médios (estes para z> 2.2), em função do *redshift*. 67
5.2 Exemplos de espectros da biblioteca de espectros sintéticos Gaia. 70
5.3 *Template* usada para $z \gtrsim 1.27$, construída com o espectro sintético Gaia ($\alpha = 0.0$, $W = 6309.5$) estendido no UV até $\lambda = 1017.9$ Å usando a *template* QSO1 do SWIRE. 72
5.4 Distribuição final do índice espectral, para os objetos com *redshift* até $z \sim 1.27$. 73
5.5 Magnitudes absolutas em função do *redshift*. De cima para baixo M_u, M_g, M_r e M_z. 75

5.6 Magnitudes absolutas (M_i) obtidas neste em função do *redshift*, comparando com magnitudes absolutas de Richards et al. (2006) as de Schneider et al. (2010). 76
5.7 Histograma da nossa magnitude absoluta M_i, em comparação com a distribuição da magnitude absoluta de Schneider et al. (2010) e a de Richards et al. (2006). 76
5.8 Diferenças médias em função do *redshift*, por intervalo de 0.2. M_i(Richards et al. 2006)$-M_i$(deste trabalho) e M_i(Schneider et al. 2010)$-M_i$(deste trabalho) 77
5.9 Medianas das diferenças entre os modelos e os espectros observados ($f_\nu Gaia - f_\nu SDSS$), normalizadas pela mediana dos espectros observados, para $\sim$ 1000 objetos aleatoriamente distribuídos em 5 intervalos de *redshift*. 79
5.10 Distribuição da fração de QSOs com pelo menos um índice morfológico ≥ 3 para os filtros *ugriz* em função do *redshift* (em intervalos de 0.5). 82

LISTA DE TABELAS

2.1 Percentagem de QSOs para quais se obtiveram os índices morfológicas em cada uma das bandas do SDSS, dentre os 105783 que totalizam a amostra do SDSS-DR7. 20

2.2 Quantidades e percentagens de objetos por intervalo de 0.5 em *redshift*, com índices morfológicos nas 5 bandas, e com algum índice ≥ 3. 25

3.1 Catálogos que contribuem para a compilação LQAC-3, número de objetos presentes no LQAC-3, e número de objetos em comum com o SDSS. 39

5.1 Medianas das diferenças entre as magnitudes aparentes obtidas dos modelos e as obtidas dos espectros observados do SDSS. 78

5.2 Valores – em função do *loockback time* – das magnitudes médias das fontes pontuais ($\langle M \rangle^{pt}$) e das fontes com PSFs anômalas ($\langle M \rangle^{ext.}$) e respetivos desvios padrão (σ). O dif. representa o módulo da diferença entre $\langle M \rangle^{pt}$ e $\langle M \rangle^{ext.}$. N corresponde ao número de objetos por intervalo de *loockback time*. 83

SUMÁRIO

RESUMO **vi**

ABSTRACT **viii**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 Objetos Quase Estelares – QSOs 2

1.2 Gaia 6

1.3 Galáxias hospedeiras 9

1.4 Objetivos 13

2 FONTE PONTUAL OU "ANÔMALA"? **15**

2.1 Índices Morfológicos 15

2.2 QSOs do SDSS – DR7 17

2.3 Resultados da análise morfológica dos QSOs do SDSS – DR7 18

2.4 Origem não extragalática das PSFs "anômalas". 25

2.5 PSFs perturbadas fora da Galáxia 28

2.6 Galáxia hospedeira? 32

2.7 Conclusões 36

3 LARGE QUASAR ASTROMETRIC CATALOG **38**

3.1 LQAC – 3 38

3.2 Índices Morfológicos 40

3.3 Magnitudes Absolutas 45

3.4 Conclusão 46

4 MORFOLOGIA DA GALÁXIA HOSPEDEIRA **48**

4.1 O perfil de Sérsic 49

4.2 Estratégia 50
4.3 Resultados 52
4.4 Conclusões 60

5 MAGNITUDES ABSOLUTAS DE QSOs 62
5.1 Introdução 62
5.2 Correções para a floresta de Lyman alfa 64
5.3 Correções à poeira intrínseca da hospedeira 65
5.4 Biblioteca de espectros sintéticos de Gaia 68
5.5 Calculando magnitudes absolutas 70
5.6 Resultados e discussão 73
5.7 Relações entre índices morfológicos e magnitudes absolutas 80
5.8 Conclusão 84

6 CONCLUSÕES GERAIS 86

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

A Artigo Publicado na revista A & A 111

B Artigo Submetido à revista A & A 121

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Existem galáxias que emitem elevadas quantidades de energia a partir de regiões compactas e centrais, cuja origem é diferente da emissão estelar. Elas são coletivamente chamados núcleos ativos de galáxias ou AGNs – do inglês *Active Galactic Nuclei*.

Dentro do grupo de AGNs foi criado um "zoológico" que inclui várias classificações e tipologias, baseadas em diferentes propriedades reveladas nas observações fotométricas e/ou espectroscópicas. Exemplos de AGNs são: Quasares/QSOs[1], galáxias Seyfert, rádio-galáxias, BL Lacs (Lawrence, 1987).

Acredita-se que a atividade destes núcleos esteja relacionada com a existência de pelo menos um buraco negro central supermassivo, com massas da ordem de $10^6 - 10^9$ $M_\odot$. O paradigma atual de AGN assume que à volta do buraco negro supermassivo existe um disco de acreção. É através deste disco que a matéria cai em direção ao buraco negro central, no processo o disco atinge elevadas temperaturas, que resultam em emissão térmica com pico no ultravioleta e que se estende até ao óptico. Acima e abaixo do disco existirá uma coroa, uma região quente e magnetizada de densidade mais baixa que o disco. Aqui os fotons do disco poderiam ser energizados, por efeito Compton inverso, dando origem a emissão nos raios-X. Envolvendo estas estruturas, existem nuvens de gás distribuídas de uma forma contínua ou fragmentada, onde são produzidas linhas de emissão por fotoionização devido à radiação do disco e da coroa. Em alguns casos pode existir um toro de gás e poeira, assim como jatos de plasma que se deslocam com velocidades relativísticas, em direção perpendicular ao plano do disco de acreção.

O Modelo Unificado (Urry & Padovani, 1995) (ver Fig.1.1) tenta explicar a diversidade

[1] Quasi Stellar Objects

de AGNs através da dependência das propriedades observadas com o ângulo de observação. Por exemplo a existência de um toro de poeira impediria observar regiões mais próximas ao buraco negro central, impossibilitando a observação de linhas de emissão largas produzidas nas nuvens de gás com maiores velocidades (a chamada *Broad Line Region* - BLR com a velocidade do gás da ordem de milhares de km/s), se a linha de visada estiver próxima do plano do toro. O espectro de tal objeto exibiria assim apenas linhas de emissão estreitas, produzidas em nuvens de gás mais afastadas e com menores velocidades (a chamada *Narrow Line Region* - NLR com a velocidade do gás da ordem de centenas de km/s). Este seria um AGN de tipo II. Por outro lado observando o mesmo objeto de uma direção mais próxima da perpendicular ao plano do toro, veremos tanto as regiões mais internas como as mais externas. Neste caso o espectro exibiria tanto linhas de emissão largas como linhas de emissão estreitas. Assim o objeto seria classificado como um AGN de tipo I.

A poeira do toro também pode absorver a radiação óptico/ultravioleta e os raios-x moles, provenientes do disco de acreção e da coroa, fazendo com que estes núcleos apareçam obscurecidos nas imagens obtidas nestes comprimentos de onda. A direção de observação introduziria assim outras diferenças observacionais entre AGNs de tipo I e II com os primeiros a exibirem núcleos mais brilhantes que os segundos, nas referidas imagens.

Observações em rádio revelaram também a existência de duas grandes populações de AGNs uma com forte emissão rádio (*radio-loud*) e outra com fraca emissão (*radio-quiet*; Kellermann et al. 1989). A origem destas duas populações permanece ainda em aberto (Kellermann et al. 2016), apesar de alguns trabalhos terem associado a formação de jatos relativísticos com o *spin* do buraco negro (Blandford 1990; Wilson and Colbert 1995).

Na Fig. 1.2 apresentamos um esquema que resume diferentes classificações de AGNs e respectivas associações com características observacionais.

O presente trabalho de doutorado incide sobre um tipo de AGNs particular, os QSOs de tipo I, que vamos descrever na seção seguinte.

1.1 Objetos Quase Estelares – QSOs

Com o desenvolvimento da rádio astronomia surgiram os primeiros catálogos de fontes de emissão rádio. Um dos primeiros desses catálogos era o Third Cambridge Catalogue

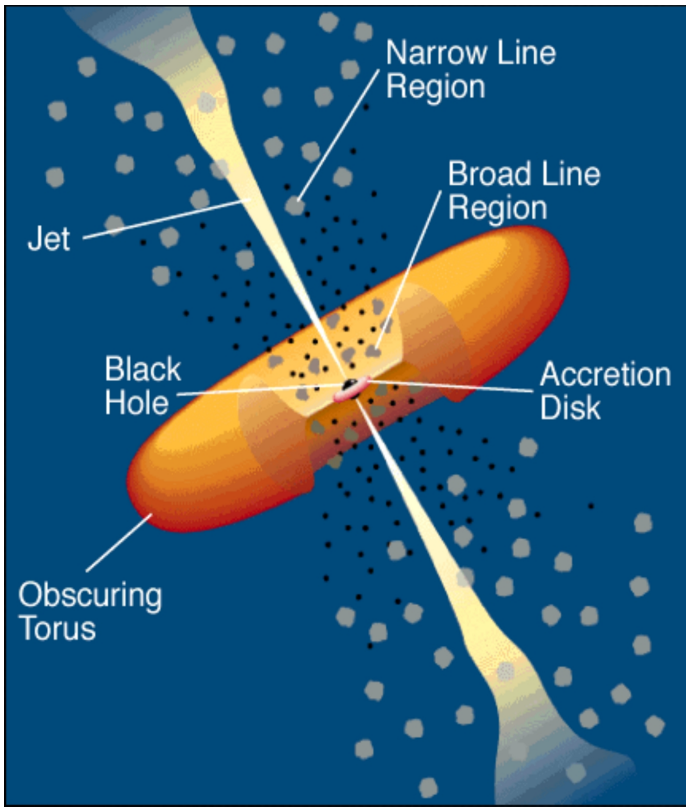

Figura 1.1: Esquema do modelo unificado de AGNs (Urry & Padovani 1995).

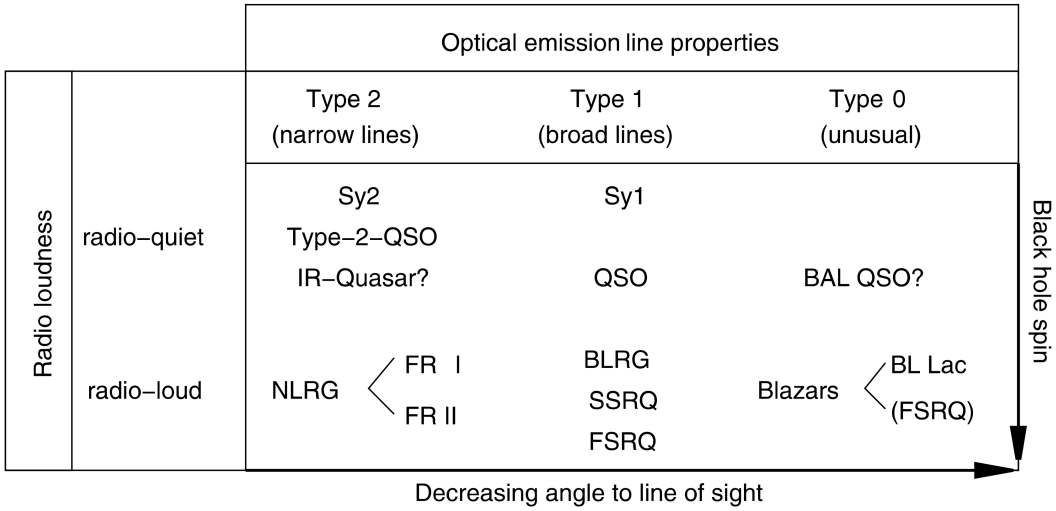

Figura 1.2: Taxonomia dos AGNs (retirado de Peter Schneider,*Extragalactic Astronomy and Cosmology an Introduction*, 2006).

compilado pelo Mullard Radio Astronomy Observatory da Universidade de Cambridge. Este catálogo continha várias fontes com emissão superior a 9 Jy [2]. Algumas dessas fontes foram associadas a galáxias próximas, mas duas delas permaneceram sem fonte associada no óptico até inicio da década de 60. Estas fontes foram associadas a objetos de aparência estelar por Matthews and Sandage (1963) e Schmidt (1963), tendo este último observado o espectro da fonte 3C273 e descoberto que se tratava de um objeto a *redshift* 0.158.

Estavam descobertos os Quasares (palavra derivada de *Quasi Stellar Radio Source*). Com o passar do tempo mais objetos a alto *redshift* e de aspecto pontual/estelar foram sendo identificados, e verificou-se que na sua maioria eram objetos *radio-quiet*, com a população *radio-loud* a representar $\sim 5-25\%$ (Kellermann et al. 1989; Padovani 1993; Kellermann et al. 1994; Jiang et al. 2007; Kellermann et al. 2016). Por isso surgiu o termo QSO de *Quasi Stellar Object* para referir esta população de objetos identificados no óptico. No trabalho aqui descrito estudaremos objetos detectados pelo Sloan Digital Sky Survey – SDSS, a área de céu observada por este levantamento é contida na observada pelo levantamento rádio FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-cm; Becker, White & Helfand 1995, White et al. 1997). Mas apesar disso não vamos fazer distinção das fontes quanto à natureza da sua emissão no rádio. As amostras objeto de estudo em nossas análises resultaram de seleções feitas no óptico e incluem objetos das duas populações.

Os QSOs têm distribuições espectrais de energia (SEDs[3]) que vão do rádio até os raios-γ. Enquanto estes dois regimes extremos de comprimento de onda são bem descritos por leis de potência, para descrever a emissão no óptico e ultravioleta no referencial de repouso do QSO, é necessário não só uma componente não térmica descrita por uma lei de potência, mas também uma componente térmica (*blue-bump*, possivelmente associada a emissão térmica do disco de acreção) e linhas de emissão (ver por exemplo Malkan & Sargent, 1982).

Na Fig. 1.3 podemos ver o aspecto típico de um espectro de um QSO, no referencial em repouso. Nesta representação podemos ver a SED entre $\sim$ 1000Å e 6000Å , com as principais linhas de emissão identificadas. Tipicamente o espectro de QSOs de tipo I exibem linhas largas de hidrogênio referentes à série de Balmer (eg. Hα, Hβ, Hγ, etc.) e no ultravioleta destaca-se a linha de Ly$_\alpha$. Nestes comprimentos de onda são também

[2] 1 Jy (jansky)$= 10^{-26}$ W m^{-2} Hz

[3] Do inglês Spectral Energy Distribution.

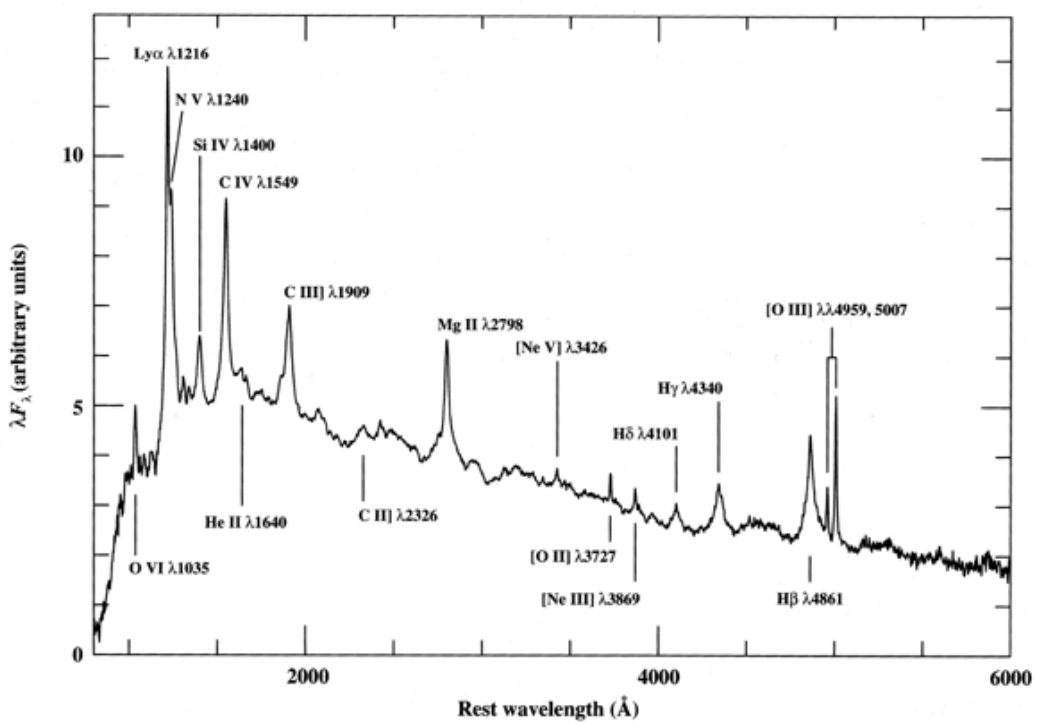

Figura 1.3: Espectro médio de um QSO, obtido a partir de mais de 700 QSOs do Large Bright Quasar Survey (Francis et al. 1991). Estão identificadas as linhas de emissão mais proeminentes.

comuns linhas largas de espécies como carbono, magnésio. É possível ver algumas linhas estreitas de oxigênio (eg. [OVI]λ1035, [OII]λ3727, [OIII]λ5007). Vê-se ainda que as linhas de emissão dos QSOs estão associadas a espécies ionizadas, ou altamente ionizadas (eg. OVI, N V, Si IV, C IV).

Os Quasares/QSOs, como a origem do nome indica, surgem então como fontes pontuais quando observados no óptico. Observados a altos *redshifts*, estão entre os AGNs mais intrinsecamente luminosos. São tão luminosos que o seu brilho pode ultrapassar o da própria galáxia hospedeira em várias magnitudes. Aliás, a luminosidade seria o fator de distinção entre QSOs *radio-quiet* e galáxias Seyfert tipo I, com estas a terem menores luminosidades que os primeiros. O limite de luminosidade para definir QSOs permanece na literatura um pouco arbitrário, por exemplo Schneider et al. (2010) usam $M_i \leq -22$, enquanto que Pâris et al. (2012, 2014) escolheu $M_i \leq -19.90$[4].

A enorme luminosidade intrínseca dos Quasares/QSOs e o seu aspecto pontual, são duas características que tornam estes objetos interessantes e até úteis para o desenvolvimento de estudos em outras áreas da astronomia. Sendo os objetos mais brilhantes, eles

[4]No referência original a definição é $M_i[\mathrm{z}=2] \leq -20.5$. Convertemos este valor para z= 0 usando a transformação de Richards et al. (2006) sendo $M_i[\mathrm{z}=0] = M_i[\mathrm{z}=2] + 0.596$

são visíveis até grandes distâncias, isto faz deles objetos excelentes para sondar os confins do Universo mais profundo. Exemplo disso é o Baryonic Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS; Dawson et al. 2013), que pretende medir o grau de aglomeração do meio intergaláctico a z$\sim$ 2.5, usando para isso medidas de QSOs observados a z$>$ 2.15.

O fato dos Quasares/QSOs serem vistos a grandes distâncias e o seu aspecto pontual, também fazem deles objetos excelentes para construir materializações de um sistema de referência fundamental, como veremos na próxima seção.

1.2 Gaia

A missão Gaia (Mignard, 2010) está entre as mais ambiciosas da astronomia moderna, sendo uma missão "pilar" da Agência Espacial Europeia (ESA). Lançada em Dezembro de 2013, e tendo iniciado as operações científicas regulares em Agosto de 2014, a missão tem uma duração nominal de cinco anos (com eventual extensão de mais um ano), durante a qual serão observados 1 bilhão de objetos, em resultado de uma complexa varredura da esfera celeste (abstraindo algumas regiões da eclíptica, a cada 7 meses). No final da missão cada objeto terá sido observado $\sim$ 80 vezes. Operando no espaço, no ponto lagrangiano L2, livre de influências atmosféricas, térmicas, e gravitacionais, com acesso ao céu inteiro, ela vai fornecer medições de astrometria, fotometria em multi-banda e, para os 20% de objetos mais brilhantes, espectroscopia de baixa resolução. O maior diferencial desta missão advém talvez do completo censo Galáctico, da amostra extragaláctica estatisticamente completa e da precisão astrométrica sem precedentes. Esta última será de 7 μas para magnitudes até G=12, 25 μas para G$= 12-15$, e 250 μas para G$>$ 15 podendo chegar até G=21, através da remoção da luz de campo (G corresponde a um filtro de banda larga do sistema fotométrico de Gaia; Jordi et al. 2010).

O principal objetivo da missão é a criação de um mapa tri-dimensional da Galáxia, permitindo ao mesmo tempo a criação de modelos químico e dinâmico da sua evolução. Mas além disto, Gaia vai contribuir também para a detecção de exo-planetas, anãs marrons, objetos do sistema solar, novas e supernovas. Irá também realizar um grande número de testes da Relatividade Geral, através do desvio da luz nos campos gravitacionais de Júpiter e Saturno e detecção de eventos de *micro-lensing*. Ainda que o principal objetivo da missão seja a medição da estrutura da Galáxia, uma vez que ela observará o céu inteiro,

haverá também objetos extragalácticos entre os objetivos secundários da missão. Devido à limitação em magnitude e na detecção de objetos extensos, estas fontes extragalácticas serão fundamentalmente QSOs e galáxias compactas. Mas a qualidade, homogeneidade, quantidade e repetibilidade das observações destes objetos faz com que sejam uma mais valia extraordinária para a astrofísica extragaláctica.

Os QSOs em particular desempenham um papel chave na missão Gaia. Sendo observados como fontes quasi-pontuais, a determinação da posição astrométrica pode ser determinada com grande precisão, por outro lado estão a distâncias tão grandes que qualquer movimento próprio que possam ter, numa direção perpendicular a linha de visada, será desprezível. Isto faz deles objetos excelentes para se construir um referencial astrométrico. Assim, se por um lado as observações de Gaia vão fornecer elementos importantes para o estudo de QSOs, por outro lado estes serão fundamentais para Gaia atingir os seus objetivos. Deste modo, o conhecimento prévio, a detecção e a caracterização de QSOs ocupa um espaço importante na missão, e é neste quadro que se insere este trabalho de doutorado.

Estima-se – baseado nas contagens e métodos de seleção do SDSS (Richards et al. 2002, Schneider et al. 2010) – que cerca de 500000 QSOs sejam observados por Gaia, dentre estes pelo menos 10000 serão usados para construir o referencial astrométrico fundamental, relativamente ao qual serão remetidas as medições astrométricas de Gaia, que vão permitir obter posições médias finais, os movimentos tri-dimensionais, e distâncias dos objetos da Galáxia.

No final da missão a precisão astrométrica sem precedentes de Gaia, já referida anteriormente, fornecerá uma nova definição e materialização do referencial celeste internacional (ICRF – International Celestial Reference Frame; Ma et al. 1998, Fey et al. 2015), que passará a ser representado por uma malha de QSOs fiduciais na banda óptica, como é preconizado na definição da International Astronomical Union (IAU) para o International Celestial Reference System (ICRS). Assim, a materialização do referencial que será construída com Gaia, o chamado "Gaia Celestial Reference Frame" (GCRF), substituirá o atual ICRF, cuja materialização é feita com posições medidas em rádio por Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Vale notar que, ao mesmo tempo, serão produzidas outras duas extensões robustas do GCRF em regimes mais brilhantes. Uma formada por galáxias compactas não-resolvidas, com cerca de 10 milhões de objetos, e outra formada

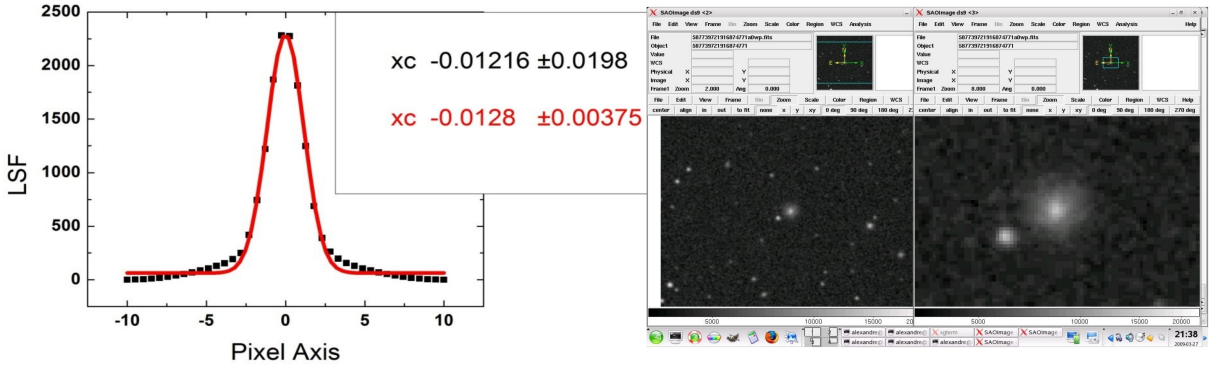

Figura 1.4: Simulação para avaliar o efeito da presença da galáxia hospedeira, na determinação do fotocentro de um QSO. À esquerda – LSF de uma fonte pontual e respectivo fotocentro (a vermelho), LSF da mesma fonte mas depois de adicionada uma componente extensa muito menos brilhante (a preto). É visível um aumento na incerteza da medida do fotocentro após a adição da componente extensa. À direita – Imagem da fonte simulada. (Andrei et al. 2011)

por cerca de meio bilhão de estrelas com posições e movimentos próprios de altíssima precisão e acurácia.

Mas nem todos os QSOs são igualmente adequados, para construir uma materialização de um referencial tão preciso como o de Gaia. Como vimos nas seções anteriores deste capítulo, os QSOs são observados com aparência quasi-pontual, mas na realidade encontram-se em galáxias, e estas são objetos extensos. Na Fig. 1.4 podemos ver uma simulação do efeito que a presença de uma galáxia hospedeira pode ter na determinação do fotocentro de um QSO. À fonte pontual simulada foi adicionada uma componente extensa mais ténue, à esquerda podemos ver (em vermelho) o resultado da determinação do fotocentro da *line spread function*[5] (LSF) do QSO simulado, é apresentada também (em preto) o resultado da determinação do fotocentro da LSF no caso do QSO+hospedeira. É possível ver que as LSFs são bastante parecidas e que as alterações provocadas pela hospedeira são muito pequenas. O fotocentro mudou muito ligeiramente de -0.0128 para -0.01216 depois de adicionada a componente extensa. Mas a incerteza na determinação do fotocentro aumentou mais de 500% de 0.00375 para 0.0198. Transformando os resultados da simulação para a escala de placa de Gaia, o incremento na incerteza seria de 60μas, o que é bem superior à precisão máxima que Gaia pretende atingir (Andrei et al. 2011).

Além da morfologia da PSF, também a variabilidade dos QSOs pode afetar as deter-

[5]Gaia faz um imageamento unidimensional das fontes pontuais, daí que a reposta óptica seja descrita por uma LSF, em vez da tradicional PSF. Nas sucessivas vezes que Gaia observa um dado objeto, a orientação da LSF relativamente ao objeto vai mudando. Ao fim de várias passagens é possível então reconstruir uma imagem bi-dimensional do objecto, ou seja a tradicional PSF.

minações dos fotocentros das PSFs (eg. Taris et al. 2011, 2013, 2016). Para minimizar estes problemas é necessário "limpar" o conjunto de QSOs fundamentais. No caso da variabilidade o monitoramento das fontes ao longo do tempo – inclusive por Gaia – permitirá escolher, para aplicações astrométricas de alta precisão, apenas as mais estáveis. Para reduzir o problema da perturbação da PSF, causado pela possível contribuição da galáxia hospedeira, foram desenvolvidos índices morfológicos, que permitem encontrar perturbações das PSFs de QSOs por comparação com a PSF média estelar (eg. Souchay et al. 2012, 2015).

A motivação do presente doutorado, surge precisamente do problema da PSF ser perturbada pela possível presença da galáxia hospedeira. Vamos explorar a morfologia das PSFs de uma amostra significativa de QSOs. Ao mesmo tempo que se obtém esta informação útil para aplicações de astrometria, pretendemos explorar se os objetos com PSFs perturbadas nos podem fornecer algum tipo de informação sobre as galáxias hospedeiras.

1.3 Galáxias hospedeiras

O fato de os QSOs serem mais comuns por volta de *redshift* $2-3$ (eg. Pâris et al. 2012) e pouco comuns no universo local, leva-nos a pensar que eles marcam uma etapa na evolução do Universo. Coincidentemente ou não, o pico máximo da formação estelar na história do Universo também se situa em z$\sim$ 2 (Madau & Dickinson 2014). Por outro lado vários trabalhos indicam a existência de fortes correlações entre a massa do buraco negro central, e a luminosidade/massa do bojo da galáxia hospedeira (eg. Magorrian et al. 1998; Ferrarese & Merritt 2000; Gebhart et al. 2000). Estas correlações parecem sugerir uma possível co-evolução entre galáxias hospedeiras e AGNs (Heckman & Best 2014). O AGN pode até exercer algum processo de *feedback* – ou removendo gás das galáxias (Kauffmann & Haehnelt 2000; Hopkins et al. 2006; Tremonti, Moustakas & Diamond-Stanic 2007) ou impedindo o gás no halo de arrefecer e alimentar o disco (eg. Bower et al. 2006; Croton et al. 2006) – o que faz parar a formação estelar na galáxia hospedeira. Por tudo isto o estudo dos QSOs e de suas galáxias hospedeiras é de enorme interesse para que se entenda a formação e evolução das galáxias ao longo da história do Universo.

Mas estudar as galáxias hospedeiras destes objetos, não é uma tarefa fácil. A luminosidade dos QSOs pode superar a da galáxia hospedeira, ofuscando-a. Na década de 90 com

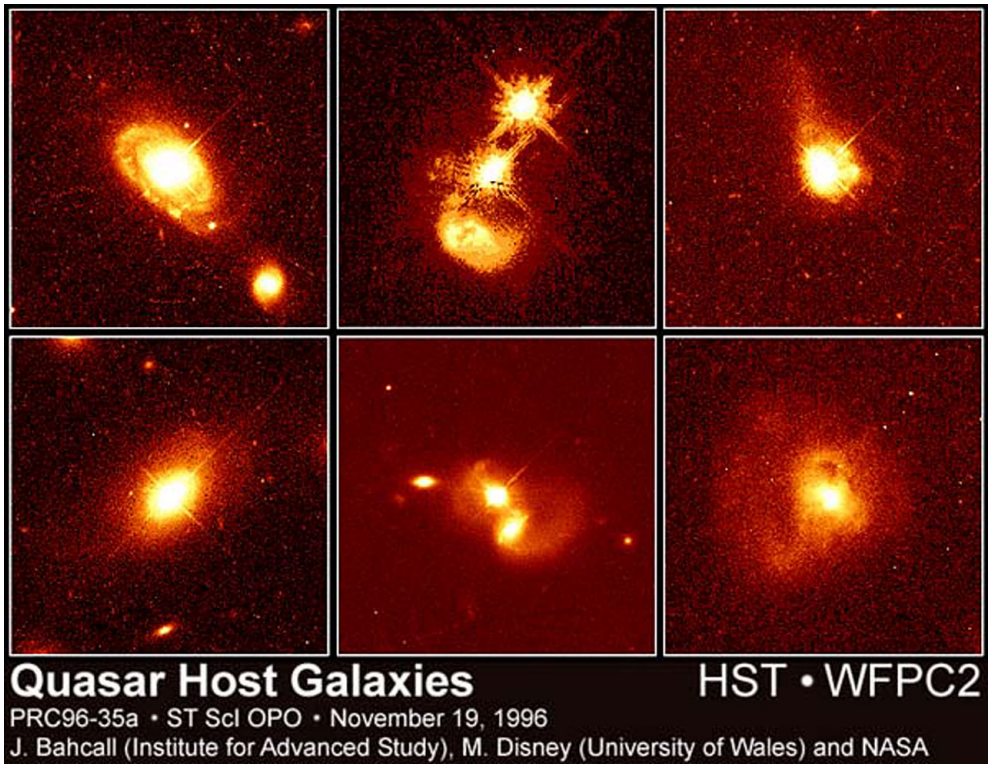

Figura 1.5: Exemplos de galáxias hospedeiras de quasares a baixo *resdshift* imagens obtidas com o Hubble Space Telescope. (créditos na imagem)

o Hubble Space Telescope (HST) é que começaram ser reveladas informações detalhadas sobre as galáxias hospedeiras de quasares.

Os trabalhos de imageamento de galáxias com o HST concentraram-se inicialmente nos objetos a baixo *redshift* (eg. Hutchings et al. 1994, Bahcall et al. 1995, Boyce et al. 1998). Eles revelaram que as hospedeiras eram normalmente galáxias luminosas, com morfologias variadas, entre elípticas, espirais, ou com morfologias distorcidas que revelavam interações com outras galáxias. Estes trabalhos também começaram a revelar que os objetos *radio-loud* se encontram sempre em galáxias elípticas, e os *radio-quiet* em todos os tipos. Foi observada ainda uma tendência para quasares mais brilhantes estarem associados a hospedeiras mais brilhantes (Hooper, Impey & Foltz, 1997). A Fig. 1.5 mostra alguns exemplos de galáxias hospedeiras de quasares observadas com o HST.

Mas como referimos, a "era dourada" dos QSOs situa-se a $z \sim 2-3$, além disso, se quisermos testar os cenários de co-evolução entre hospedeiras e buracos negros supermassivos é importante estudar as galáxias hospedeiras nesses *redshifts* mais elevados.

Os esforços para estudar galáxias hospedeiras de QSOs a alto redshift começam com o trabalho de Kukula et al. (2001). Neste trabalho, que é baseado em observações

feitas com o HST, os autores comparam três grupos de objetos a z$\sim$ 0.2, z$\sim$ 1 e z$\sim$ 2. Os autores sugerem que as hospedeiras dos QSOs *radio-loud* já se teriam formado a z$>$ 3 evoluindo passivamente até às elípticas dos dias de hoje, enquanto as galáxias hospedeiras dos objetos *radio-quiet* têm uma formação mais recente, dado que as hospedeiras destes parecem ser 2 a 4 vezes menos massivas a z$\sim$ 2 do que a z$\sim$ 0.2. Mais tarde Falomo (2004) encontrou uma diferença de luminosidade constante entre as hospedeiras de z$\sim$ 2 até aos dias de hoje, sugerindo que em ambos os casos as hospedeiras já estariam bem formadas em z$\sim$ 2.

Indicações de que hospedeiras de QSOs se teriam formado bem antes do pico da atividade de QSOs a z$\sim 2-3$ também foram reportadas por Kotilainen et al. (2007) a partir de uma amostra de objetos a 2 $<$z$<$ 3, e Kotilainen et al. (2009) 1 $<$z$<$ 2. Os autores sugerem que as hospedeiras dos QSOs das duas amostras, são elípticas inativas de grande luminosidade, sendo as dos objetos *radio-loud* mais luminosas que as dos *radio-quiet*.

Mas enquanto uns trabalhos reportam hospedeiras inativas em termos de formação estelar, outros encontram evidências de hospedeiras com populações jovens e intermédias características de um *starburst* recente (Jahnke et al. 2004b; Canalizo et al. 2006). Mais tarde Schramm et al. (2008) também encontrou QSOs em hospedeiras muito brilhantes ($M_V = -26.3$) com cores azuis reveladoras da contribuição de uma população de estrelas jovens, e recentemente Vayner et al. (2016) mediu emissão extensa em Hα em duas hospedeiras de QSOs, estimando taxas de formação estelar na ordem ~ 78.4 M$_\odot$ yr^{-1} e ~ 29 M$_\odot$ yr^{-1}.

Um outro aspecto que tem motivado vários trabalhos, é saber o que desperta uma atividade tão grande nos QSOs, e uma das explicações seria a colisão entre galáxias. Esta hipótese ganhou força com as observações do HST que revelaram uma fração de colisões e interações maior no passado e a existência de galáxias hospedeiras a baixo *redshift* com morfologias distorcidas (ver eg. Fig. 1.5). No entanto, as galáxias hospedeiras de QSOs, não aparentam ter uma incidência de colisões/fusões maiores que as galáxias (sem AGNs) de campo (McLure 2006). A questão ainda não está encerrada, Bennert et al. (2008) observando algumas galáxias hospedeiras classificadas como *early-type* encontrou vestígios de colisões ou interações passadas. Canalizo et al. (2013) também encontrou sinais de fusões passadas e populações estelares intermédias, em galáxias classificadas anteriormente

como passivas. Estes exemplos refletem as dificuldades de observar hospedeiras de QSOs, e também o impacto do avanço da instrumentação e das técnicas de observação.

Do estudo de 69 hospedeiras a baixo *redshift* 0.142 <z< 0.198 Letawe, Letawe & Magain (2010) acharam 25% de espirais 51% elípticas e 60% do total apresentavam sinais de interação. Ainda em baixo *redshift*, outros trabalhos encontraram fração maior de espirais, eg. Guyon, Sanders & Stockton (2006) encontraram 36% elípticas, 39% com disco proeminente, 25% de tipo indeterminado. Considerando uma amostra de QSOs de baixa luminosidade, Busch et al. (2014) encontrou 50% de galaxias disco sendo que 86% destas teriam barras.

Se atentarmos à emissão rádio, os quasares *radio-loud* são encontrados normalmente em galáxias elípticas enquanto que os *radio-quiet* aparecem tanto em elípticas como espirais (Hamilton et al. 2002; Falomo 2004). Mas a razão porque isto acontece permanece ainda pouco clara.

Estes trabalhos baseiam-se todos em observações de alta-resolução de alguns objetos específicos. Dependem de técnicas elaboradas (eg. subtração da PSF da componente AGN), que exigem excelentes condições de céu e muito tempo de observação nos melhores telescópios, na tentativa de separar a componente AGN da componente hospedeira. Estas técnicas mostram-se mais eficazes a baixo *redshift* (eg. z$\leq$ 0.5), mas a alto redshift (z> 1) as dificuldades permanecem enormes. O número de objetos estudados é da ordem das dezenas e cai consideravelmente com o aumento do *redshift*.

Uma das maiores, se não ainda a maior, amostras num trabalho sobre hospedeiras a z> 1, foi estudada por Rosário et al. (2013). A amostra continha 289 objetos no intervalo 1 <z< 2. Este trabalho usou observações no infravermelho longínquo com o argumento de que a poeira fria seria aquecida por formação estelar, e que a contaminação do AGN neste tipo de emissão seria mínima. Ao não depender da capacidade de separar a contribuição do AGN da hospedeira por meio de técnicas complicadas, foi possível ter uma amostra de tamanho sem precedentes. A nossa proposta no presente trabalho, também passa pela não necessidade de imagear a hospedeira propriamente dita, e pelo uso da estatística como forma de obter informação de galáxias hospedeiras.

1.4 Objetivos

Vimos que os QSOs são objetos interessantíssimos quer do ponto de vista astrofísico, quer do ponto de vista da astrometria. Decorrente da aplicação de QSOs para construção da materialização de sistemas de referências, vimos que nem todos são igualmente bons para o efeito. O trabalho do presente doutorado parte da contribuição para o esforço de escolher os melhores entre os QSOs, para aplicações em astrometria. Como vimos também, uma das causas de degradação das PSFs dos QSOs pode ser a contribuição de uma componente extensa associada à galáxia hospedeira. Tendo em conta essa possibilidade, as perturbações das PSFs são pela primeira vez exploradas como forma de obter informação sobre as galáxias hospedeiras. Os objetos menos propensos a serem utilizados na materialização de sistemas de referência, podem ser de grande interesse para o estudo da astrofísica de QSOs e suas hospedeiras.

Assim constituíram objetivos deste programa de doutorado:

- fazer uma análise morfológica das PSFs de uma amostra significativa de QSOs, cujos resultados possam ter aplicações no campo da astrometria, e que possam ser também usados como comparação para resultados futuros obtidos pela missão Gaia.
- obter classificações morfológicas das galáxias hospedeiras.
- explorar possíveis correlações entre as classificações morfológicas, obtidas nos itens anteriores, e outras propriedades como *redshift*, comprimento de onda, magnitudes absolutas ou índices espectrais.

Acreditamos que a análise da morfologia das PSFs, providenciará informação útil para os esforços de construir materializações de sistemas de referência baseados em QSOs, como por exemplo no contexto da missão Gaia. As técnicas usadas nesta tarefa, serão utilizadas pela primeira vez para explorar propriedades das galáxias hospedeiras de QSOs. Devido à simplicidade de aplicação, elas podem tornar úteis para o estudo de galáxias hospedeiras os dados dos modernos levantamentos.

Os objetivos propostos no primeiro item será abordado nos Capítulos 2 e 3 desta tese. Neles descreveremos as amostras (diferentes em cada um dos dois Capítulos), metodologias, e apresentaremos os resultados obtidos acompanhados de uma discussão. Em particular, o trabalho descrito no Capítulo 3 faz parte de um artigo publicado em co-autoria.

O segundo item dos objetivos será abordado no Capítulo 4, onde também apresentaremos e discutiremos resultados obtidos.

Finalmente o terceiro item, será concretizado ao longo de toda a tese. No que às magnitudes absolutas diz respeito, apresentamos no Capítulo 5 uma abordagem diferente de as calcular, desenvolvida no decorrer do presente doutorado, e que resultou num artigo submetido à revista *Astronomy & Astrophysics* (recomendado para publicação após alterações). No final do Capítulo 5 abordaremos as relações entre morfologia da PSF e magnitudes absolutas dos QSOs.

Ao longo deste trabalho usaremos uma cosmologia plana com $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$ e $H_0 = 70$ km s^{-1} Mpc^{-1}.

Capítulo 2

FONTE PONTUAL OU "ANÔMALA"?

Neste capítulo apresentamos uma análise morfológica dos QSOs do catálogo de Schneider et al. (2010), em que índices morfológicos serão usados para avaliar os objetos que apresentam PSFs que se desviam do comportamento esperado para fontes pontuais. Os resultados são discutidos para inferir propriedades das galáxias hospedeiras de QSOs.

2.1 Índices Morfológicos

Os índices morfológicos utilizados neste trabalho para avaliar a morfologia dos QSOs foram previamente utilizados no GAIA Initial QSO catalogue (GIQC III; Andrei et al. 2011) e no Large Quasar Astrometric Catalogue – 2 (LQAC-2; Souchay et al. 2012). A ideia por trás destes índices consiste em comparar a *Point Spread Function* (PSF) do quasar com a PSF local média das estrelas.

A rotina DAOFIND do IRAF é usada para encontrar automaticamente, numa dada imagem, os QSOs e ao mesmo tempo as estrelas que vão servir de comparação. Essa rotina ajusta as PSFs das diferentes fontes com uma gaussiana, e guarda num arquivo de saída para cada imagem, as coordenadas (x e y em pixels) e 3 parâmetros morfológicos da PSF para cada uma das fontes detectadas na imagem. O primeiro parâmetro *Sharp* dá uma indicação do quão estreito e aguçado é o perfil da PSF através da razão entre, a diferença entre o peso do pixel central e a média dos pixels em volta (excluindo pixeis maus), e o peso no mesmo pixel dado pela Gaussiana que dá o melhor ajuste. O segundo

parâmetro *Sround* mede a circularidade da seção de corte a meia altura mediante a razão entre uma medida da simetria bilateral do objeto e uma medida da simetria quadrupla do objeto. Finalmente o terceiro parâmetro *Ground* dá uma indicação do quão bem a PSF é ajustada por uma Gaussiana através da razão entre, a diferença do peso da Gaussiana que dá o melhor ajuste em x e da que dá o melhor ajuste em y, e a média das Gaussianas que dão o melhor ajuste em x e em y.

Para cada um dos parâmetros morfológicos é definido um índice morfológico, assim para cada QSO se tem que:

$$M_{PC} = |P_Q - \overline{P_s}|/\sigma s, \tag{2.1}$$

onde M é o índice morfológico (SHARP, SROUND, GROUND) numa dada banda C para um dado QSO correspondendo ao parâmetro morfológico da PSF P (*Sharp, Sround, Ground*), P_Q é então o parâmetro morfológico do QSO obtido pela rotina DAOFIND, $\overline{P_s}$ é a média do parâmetro morfológico, dado também pelo DAOFIND, obtida para as estrelas vizinhas do QSO, e σs é o desvio padrão do parâmetro morfológico para essas mesmas estrelas. Quanto menor for a diferença entre a PSF do QSO e a PSF local média das estrelas, mais próximo de zero é o índice morfológico, e mais pontual será o QSO em questão. Quanto maior for o índice morfológico mais a PSF do QSO se afasta da PSF estelar média, e menos pontual será o objeto. Os desvios significativos relativamente à PSF estelar média são interpretados como presença de uma componente extensa, no caso, provavelmente associada à galáxia hospedeira. Em princípio os índices morfológicos são independentes entre si, pois eles refletem diferentes tipos de perturbações nas PSFs. Então para que se considere a detecção da presença de uma componente extensa, basta que um dos índices morfológicos (SHARP, SROUND ou GROUND) se afaste significativamente da PSF estelar média.

A análise é automatizada para aplicação num vasto conjunto de imagens através de um algoritmo feito em FORTRAN que vai processar a rotina DAOFIND em cada imagem. Posteriormente um segundo algoritmo também feito em FORTRAN vai identificar o QSO nos arquivos de saída do DAOFIND e determinar os valores $\overline{P_s}$ e σs para estrelas que estão próximas ao QSO, e calcula então os índices morfológicos do QSO. As estrelas utilizadas na determinação da PSF média são escolhidas segundo alguns critérios de qualidade:

- a estrela não pode estar muito próxima do limite da imagem, ou seja consideramos apenas objetos a mais de 10 pixels do bordo da imagem,

- só são consideradas estrelas para as quais foi possível obter os 3 parâmetros morfológicos,
- a estrela tem que estar isolada, ou seja não pode ter fontes a menos de 10 pixels no plano da imagem e que possam interferir na qualidade da PSF da estrela,
- as estrelas começam a ser escolhidas na proximidade do QSO,
- é imposto o número mínimo de 10 estrelas boas para que a PSF média seja obtida, e imposto também um limite máximo de 1500 estrelas para evitar que o programa perca demasiado tempo nas imagens com muitas estrelas.

O índice morfológico de um dado QSO só é obtido se todos estes critérios forem verificados, e assim se obtiver uma boa PSF estelar média.

Num teste feito com 1343 QSOs do SDSS, distribuídos por todo o intervalo de magnitudes, de cores e de *redshift*. Verificou-se que para todas as estrelas, os três índices morfológicos são em média iguais a ~ 0.01 (Andrei et al. 2015), e apenas $\sim 0.3\%$ das delas apresentam PSFs perturbadas. Assim estes serão os valores referência para fontes pontuais para as imagens do SDSS.

2.2 QSOs do SDSS – DR7

O Sloan Digital Sky Survey - SDSS é uma forma de ter uma amostra ampla e estatisticamente completa, com imagens em 5 filtros (*ugriz*) para todos os QSOs, além de fornecer também *redshift* (espectroscópico) e 5 magnitudes num mesmo sistema. O catálogo de quasares compilado por Pâris, et al. (2012), correspondente à 9^{th} *data release* (DR9) do SDSS, era o mais moderno catálogo de quasares disponível no início do presente doutorado. A versão DR9 foi a primeira de uma série de catálogos de quasares (Pâris, et al. 2012, 2014, 2017) compilados no âmbito do Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS, Dawson, et al. 2013). Estes catálogos procuram selecionar quasares de interesse para o BOSS, com z$>$ 2.15, mas como mencionado no final do Capítulo 1, é nosso objetivo produzir uma análise de um conjunto de quasares que nos permita estabelecer uma base de comparação para futuras análises feitas com os quasares observados pela missão Gaia, que se preveem ser na sua maioria com z$<$ 2. Por essa razão optamos pelo catálogo de

quasares detectados pelo SDSS DR7, compilado por Schneider, et al. (2010), cuja maioria dos objetos tem z< 2.

A principal amostra de QSOs analisada no trabalho realizado durante o presente doutorado, corresponde ao catálogo do SDSS DR7 de Schneider, et al. (2010), e é constituída por 105783 QSOs de tipo I, espectroscopicamente confirmados. Todos os objetos foram selecionados por terem pelo menos uma linha de emissão com largura a meia altura (FWHM) maior que 1000 km s^{-1}, ou linhas de absorção interessantes/complexas (eg. floresta de Ly_α, ou *Broad absorption lines* - BALs) magnitude aparente $i \gtrsim 15.0$, e magnitude absoluta $M_i \leq -22.0$ (assumindo uma lei de potência com $\alpha = -0.5$). A distribuição de *redshift* vai de 0.065 até 5.46, sendo a mediana ~ 1.49 (valor compatível com o esperado para os quasares de Gaia), cobrindo uma área do céu correspondente a ~ 9380 graus quadrados (ver Fig.2.1).

Foi montado um banco de imagens contendo *frames* nas cinco bandas *ugriz* do SDSS para todos os QSOs da amostra, num total de 528915 imagens correspondendo a aproximadamente 2 TB de dados. Cada um dos *frames* tem 2048×1024 pixels com uma escala de placa de 0.39"/pixel.

Para baixar uma quantidade tão grande de imagens usamos o interface CasJobs[1] para obter os URLs[2] das imagens necessárias mediante uma busca feita em SQL. O volume de dados tão grande exigiu a utilização de recursos informáticos do LIneA (Observatório Nacional Rio de Janeiro, Brasil).

Procedemos à análise morfológica dos QSOs do SDSS-DR7, sobre as imagens do SDSS, usando os índices morfológicos descritos na seção anterior. Na próxima sub-seção apresentamos os resultados obtidos dessa análise.

2.3 Resultados da análise morfológica dos QSOs do SDSS – DR7

Nesta seção apresentamos os resultados, da análise morfológica dos QSOs do SDSS-DR7, usando os índices morfológicos.

O processamento das 528915 imagens durou vários meses, na tabela 2.1 são apresen-

[1] http://skyserver.sdss.org/Casjobs

[2] exemplo de um URL de uma das imagens:
http://data.sdss3.org/ses/dr8/boss/photoObj/frames/301/4203/5/frame-i-004203-5-0405.fits.bz2

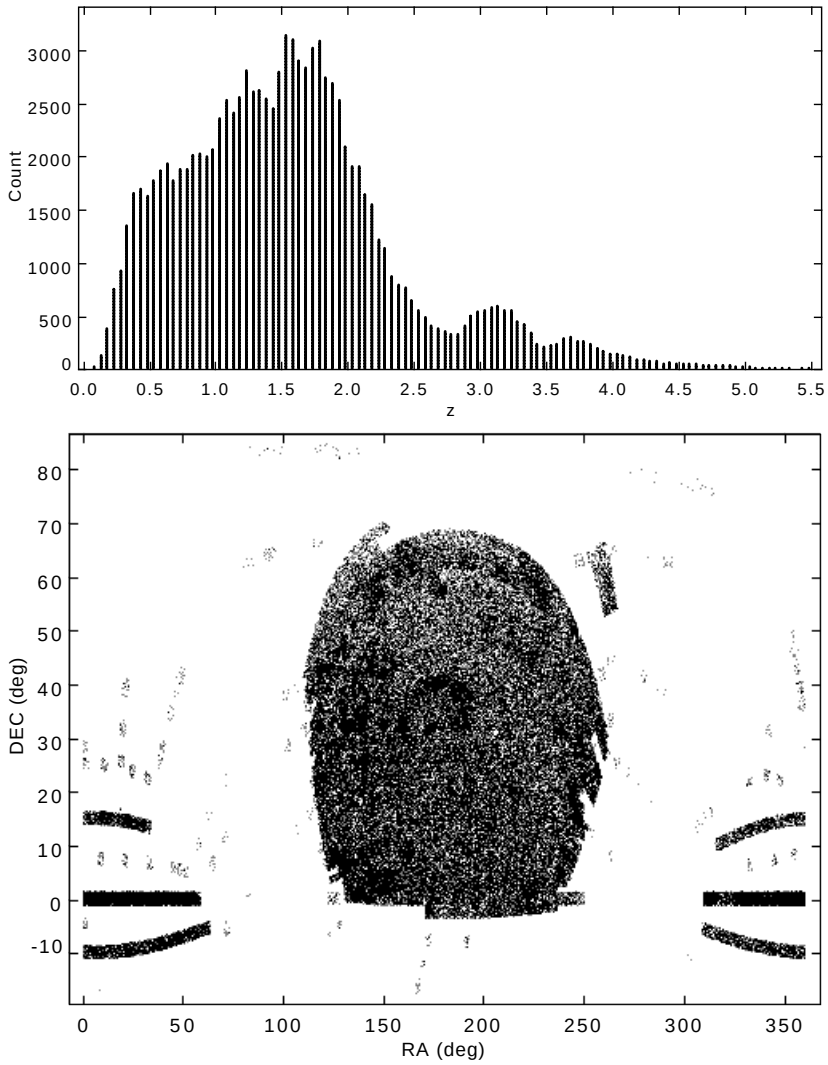

Figura 2.1: Em cima – Distribuição de *redshift* dos QSOs do SDSS(DR7). Embaixo – Distribuição dos mesmos no plano do céu.

tadas as percentagens de QSOs do SDSS – DR7 para os quais foram determinados os três índices morfológicos, em função dos filtros *ugriz*. É possível ver que a percentagem de objetos classificados não chega a 100% em nenhuma das bandas, o que pode ser explicado pelos critérios de qualidade referidos no final da seção 2.1, por vezes a imagem não possui estrelas de qualidade em suficiente número, ou o QSO está demasiado próximo de uma estrela ou da margem da imagem, impossibilitando a obtenção do índice morfológico. Vê-se também que a percentagem de objetos classificados na banda z é menor que nas outras bandas, isto poderá ser explicado pela menor sensibilidade do SDSS neste filtro comparativamente às bandas *gri*. À semelhança da banda z, a banda u tem também menor sensibilidade, mas o fato do QSO ser mais brilhante nos comprimentos de onda mais azuis poderá compensar a menor sensibilidade da banda e fazer com que a percentagem de QSOs com índices morfológicos na banda u seja maior que na banda z.

	u	g	r	i	z
Objetos classificados (em pelo menos uma banda)	80.86%	89.34%	83.15%	75.74%	60.83%

Tabela 2.1: Percentagem de QSOs para quais se obtiveram os índices morfológicas em cada uma das bandas do SDSS, dentre os 105783 que totalizam a amostra do SDSS-DR7.

Para que a análise seguinte não fosse afetada pelas diferenças de sensibilidade dos filtros do SDSS *ugriz*, restringimos a amostra apenas aos objetos para os quais os índices morfológicos foram calculados em todas as bandas.

Na Fig. 2.2 podemos ver histogramas da distribuição de cada índice morfológico (SHARP, SROUND e GROUND) em função dos filtros *ugriz*, para os 57893 QSOs – cerca de 54.7% do total de objetos do catálogo do SDSS DR7 – para os quais os índices morfológicos foram obtidos em todas as bandas. Os três índices morfológicos mostram que a maioria dos QSOs apresentam comportamento de fonte pontual, ou seja com índices mais próximos de zero. No entanto um número razoável de objetos apresentam índices que se afastam bastante de zero, revelando um desvio assinalável em relação à PSF estelar média. Considerando os QSOs que têm pelo menos um dos três índices com valor maior ou igual a 3, vemos que para o filtro u há 1692 (2.9%) objetos nestas condições, 720 (1.2%) no g, 1297 (2.2%) no r, 2254 (3.9%) no i e 6181 (10.7%) no filtro z. Verificamos também que, para um dado filtro, os índices morfológicos se comportam de fato como independentes. Ou seja, raramente uma perturbação detectada por um dos três índices morfológicos (SHARP,

SROUND, GROUND) coincide com uma perturbação detectada por outro dos índices, e são menos ainda os casos em que uma PSF surge como "anômala" nos três índices ao mesmo tempo. Podemos constatar também que as bandas mais azuis são mais sensíveis à componente pontual, enquanto as bandas mais vermelhas ganham preponderância em relação às mais azuis quando as PSFs dos QSOs apresentam índices cada vez maiores, correspondentes a maiores desvios da em relação à PSF estelar média. Isto pode ser devido ao fato da componente pontual associada ao AGN ser mais importante nos comprimentos de onda mais azuis, e à medida que consideramos comprimentos de onda maiores, a importância relativa da componente extensa (associada à galáxia hospedeira) aumenta. A única exceção a este comportamento geral, parece verificar-se no índice morfológico SHARP para o filtro u. Esse comportamento será discutido mais adiante.

Para testar os efeitos que a magnitude aparente dos objetos poderia ter nos resultados, selecionamos dentre os 57893 QSOs os que tinham magnitude aparente i entre 18 e 19. Este intervalo foi escolhido por corresponder ao máximo na distribuição de magnitudes aparentes i. Na Fig.2.3 mostramos o comportamento dos três índices morfológicos para cada filtro do SDSS ($ugriz$) em função do *redshift*, à esquerda para totalidade dos 57893 QSOs, à direita mostramos o resultado equivalente mas para os objetos com magnitude i entre 18 e 19. Comparando os dois grupos de objetos podemos ver que o comportamento dos índices é em tudo semelhante. As correlações encontradas entre os resultados obtidos com e sem corte em magnitude são fortes, com coeficientes de correlação: de 0.84 para o índice SHARP, 0.90 para o SROUND e 0.83 para o GROUND. Isto sugere que os índices morfológicos não dependem da magnitude aparente dos QSOs. Assim, para o restante da análise vamos considerar todos os 57893 sem aplicar cortes em magnitude aparente. Podemos ver na mesma figura que o valor médio dos três índices se mantem aproximadamente constante, não variando significativamente com o *redshift*, no caso dos filtros g, r e i. Por outro lado nos filtros z e u verifica-se uma evolução dos índices com o *redshift*. Os valores médios calculados no filtro z parecem acompanhar a distribuição em *redshift* da amostra, aumentando até *redshift* ~ 1.5, e diminuindo para *redshifts* maiores. Já para o filtro u podemos ver que o seu comportamento se mantem constante até *redshift* ~ 2.5 aumentando depois os valores médios dos três índices para os objetos mais distantes. Os valores médios dos índices são sempre $\lesssim 1$, o que indica que para todos os filtros e em todos os intervalos de *redshift* a maioria dos QSOs são observados como fontes pontuais.

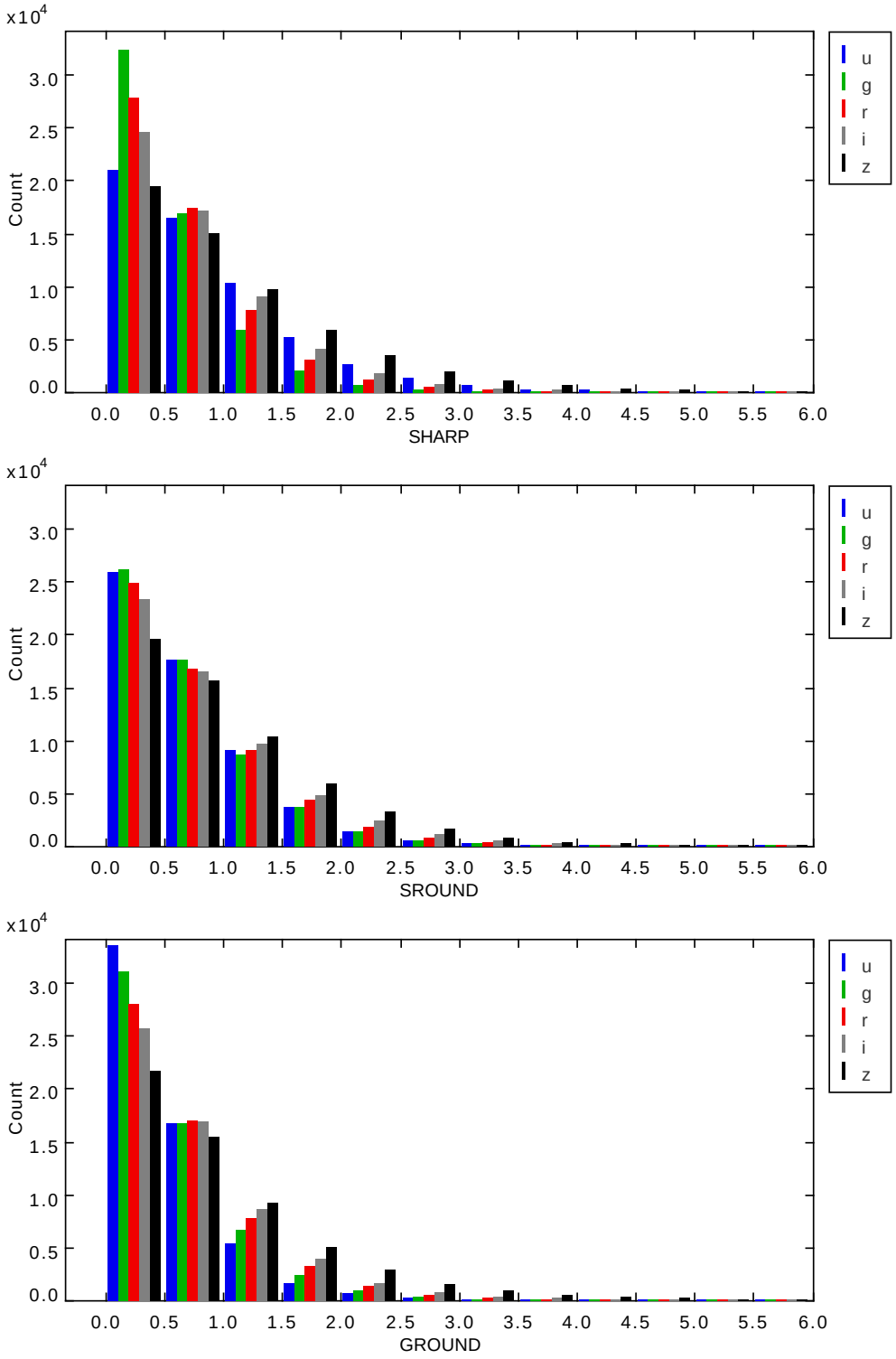

Figura 2.2: Histogramas dos índices morfológicos. Topo – SHARP, meio – SROUND, fundo – GROUND. Todos os índices mostram que a maioria dos QSOs apresenta pontual. Os filtros de maior comprimento de onda parecem ser mais sensíveis a perturbações na PSF.

Também é possível ver que para cada índice morfológico há uma separação dos valores médios em função do filtro, com estes a aumentar na sequência *griz*, mostrando que os filtros mais vermelhos talvez sejam mais sensíveis a possíveis perturbações associadas à galáxia hospedeira. O filtro *u* mostra também aqui um comportamento à parte. No caso do índice GROUND ele tem os menores valores médios, obedecendo à sequência mencionada anteriormente em que a média do índice aumenta com o aumento do comprimento de onda do filtro. Mas no caso do índice SROUND ele apresenta um comportamento mais próximo ao do filtro *g* e no caso do índice SHARP ele torna-se o segundo filtro com valores médios mais altos.

Na Tabela 2.2 apresentamos alguns números que refletem os resultados dos índices morfológicos em função do *redshift*, com este a variar de 0 a 3.5 dividido em intervalos de 0.5 (os mesmo intervalos apresentados na Fig. 2.3). Nas primeiras três linhas mostramos respectivamente a distribuição de todos os objetos do catálogo de Schneider et al.(2010), o número de objetos para os quais os índices foram calculados nas 5 bandas do SDSS, e a fração que estes representam face ao total de QSOs por intervalo de *redshift*. Nos pares de linhas seguintes apresentamos o número de QSOs com PSF "anômala" para os quais se calculou pelo menos um índice morfológico ≥ 3, mediante a análise das imagens correspondentes a cada um dos filtros do SDSS (*ugriz*). É apresentada também a fração destes objetos "anômalos" face aos QSOs que em cada intervalo de *redshift* têm índices morfológicos determinados nas 5 bandas.

Vamos agora debruçarmo-nos nestes objetos que apresentam PSFs "anômalas", ou seja que apresentam pelo menos um índice morfológico ≥ 3. Estes QSOs cujo comportamento mais se afasta do de uma fonte pontual, constituem o conjunto de objetos mais problemáticos do ponto de vista astrométrico, mas ao mesmo tempo são os mais interessantes para discutirmos propriedades das respectivas galáxias hospedeiras. As percentagens da Tab. 2.2 mostram que para todos intervalos de *redshift*, os filtros *griz* são mais sensíveis a pertubações quanto maior o comprimento de onda associado, como de resto já tínhamos comentado quando consideramos os valores médios dos índices. Essas percentagens ressaltam novamente o comportamento dos índices calculados com as imagens da banda *z* que se destacam consideravelmente dos demais, com um forte aumento até *redshift* entre 1 e 1.5. Também se verifica um aumento considerável na percentagem de QSOs com PSFs "anômalas" nas imagens do filtro *u* especialmente a partir de z> 2. Mas

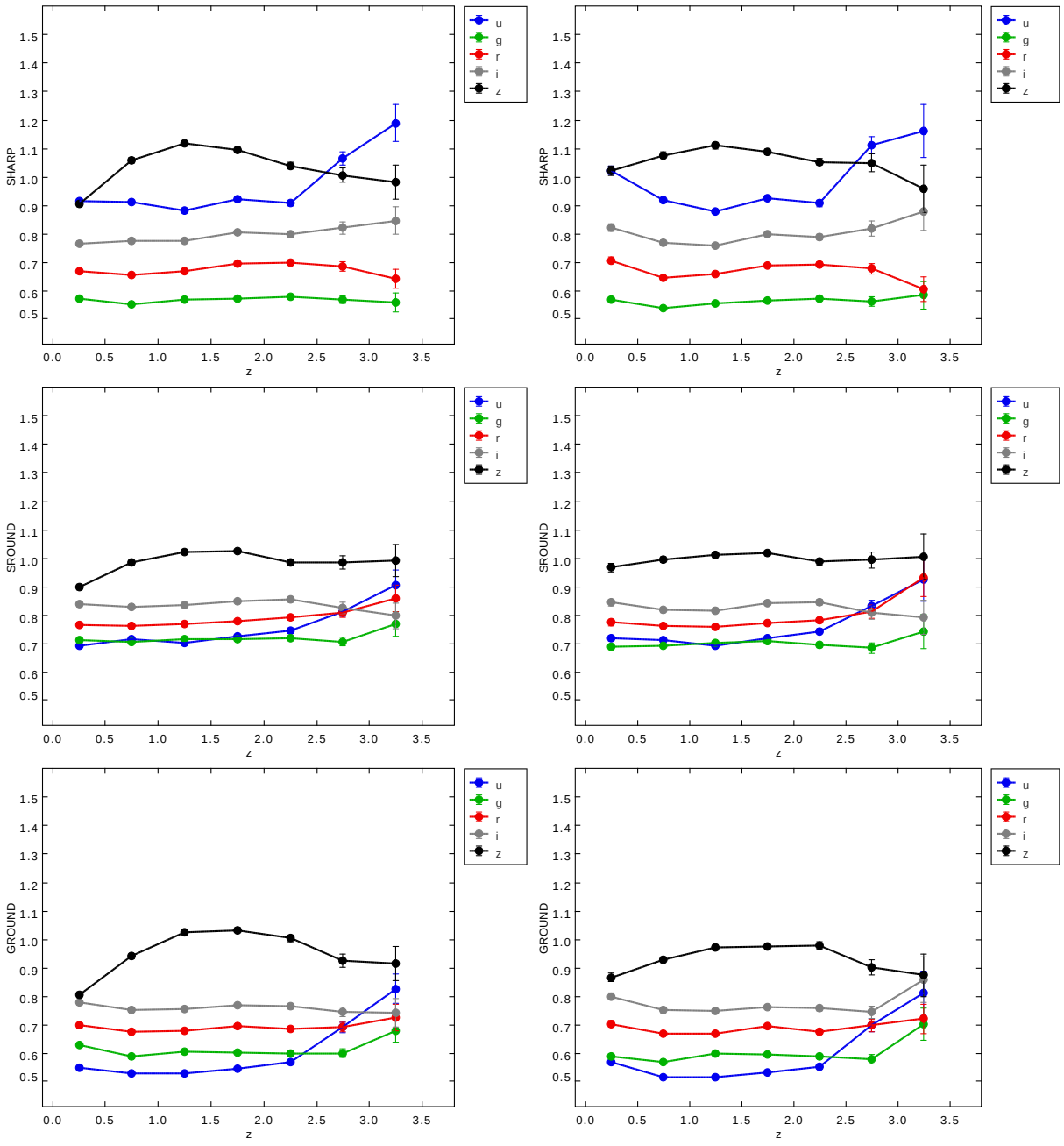

Figura 2.3: Distribuição do valor médio dos índices morfológicos para os filtros *ugriz* em função do *redshift* (em intervalos de 0.5). Topo – SHARP, meio – SROUND, fundo – GROUND. Coluna da esquerda – Resultados para todos os 57893 objetos. Coluna da direita – Os resultados equivalentes mas para o conjunto de objetos com magnitude aparente i entre 18 e 19. A duas colunas mostram os mesmos resultados demonstrando que os índices morfológicos não dependem da magnitude aparente.

z	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75
N_{Total}	8492	19137	25592	28042	12345	4246	4436	3127
$N_{5ind.}$	6612	11802	15224	15592	7036	1398	232	14
$\%_{5ind.}$	77.86	61.67	59.49	55.60	56.99	32.93	5.23	0.45
$N_{\sigma 3u}$	193	302	368	493	227	86	23	0
$\%_{\sigma 3u}$	2.92	2.56	2.42	3.16	3.23	6.15	9.91	0
$N_{\sigma 3g}$	98	157	180	194	74	13	4	0
$\%_{\sigma 3g}$	1.48	1.33	1.18	1.24	1.05	0.93	1.72	0
$N_{\sigma 3r}$	156	243	296	386	167	43	6	0
$\%_{\sigma 3r}$	2.36	2.06	1.94	2.48	2.37	3.08	2.59	0
$N_{\sigma 3i}$	278	422	547	623	319	57	8	1
$\%_{\sigma 3i}$	4.20	3.58	3.59	4.00	4.53	4.08	3.45	7.14
$N_{\sigma 3z}$	420	1178	1868	1814	739	137	24	2
$\%_{\sigma 3z}$	6.35	9.98	12.27	11.63	10.50	9.80	10.34	14.29

Tabela 2.2: Quantidades e percentagens de objetos por intervalo de 0.5 em *redshift*. N_{Total} – Distribuição de todos os 105783 QSOs do catálogo de Schneider et al. (2010).$N_{5ind.}$ – QSOs para os quais se obtiveram os índices morfológicas em todas as 5 bandas do SDSS, aqui as percentagens $\%_{5ind.}$ são calculadas relativamente a N_{Total}. $N_{\sigma 3x}$ – QSOs que têm pelo menos um dos índices morfológicos ≥ 3, em que x indica o filtro do SDSS (*ugriz*), aqui as percentagens $\%_{\sigma 3x}$ são calculadas relativamente a $N_{5ind.}$.

serão os efeitos notados nos filtros u e z de natureza astrofísica, ou serão manifestação de algum problema nas observações?

2.4 Origem não extragalática das PSFs "anômalas".

Nesta seção vamos discutir a possibilidade dos índices morfológicos de valores ≥ 3 não serem manifestação da presença da galáxia hospedeira do QSO.

Vimos na seção anterior que os índices morfológicos calculados sobre as imagens correspondentes aos filtros u e z se destacam dos demais filtros do SDSS. Os filtros u e z são no SDSS os que apresentam menor sensibilidade, mas não nos parece que o comportamento distinto possa ser explicado pela deterioração da qualidade das imagens nestes dois filtros. Primeiro que os índices morfológicos são pensados para salvaguardar esse tipo de efeito ao comparar a PSF do QSO com uma PSF média estelar calculada a partir das estrelas da mesma imagem que se encontram na vizinhança, assim se a imagem tiver má qualidade seja por limitações da instrumentação, seja pelas condições apresentadas na noite de observação (por exemplo o *seeing*) elas aumentariam o desvio padrão da PSF média estrelar de tal modo que o índice morfológico do QSO não é afetado. Segundo se a menor

sensibilidade destes dois filtros fosse a causa do comportamento distinto dos índices, não seria de esperar as evoluções não monótona em *redshift* que são observadas na seção anterior. Além disso já vimos que os índices são independentes das magnitudes aparentes. Por isso achamos que os resultados nas bandas u e z são de fato reais manifestações de aspectos astrofísicos.

Um possível fator de contaminação dos índices morfológicos adviria do fato de existir uma estrela da Galáxia na linha de visada do QSO. Esta possibilidade foi discutida por Assafin et al. (2013). Nesse trabalho os autores discutem como a razão de fluxo entre QSO e estrela, e o grau de alinhamento de ambos afetaria a PSF de QSOs. Note-se que tal estrela teria que preencher critérios específicos, como por exemplo ser muito fraca, para passar despercebida aos algoritmos de detecção de fontes pontuais (lembramos que a detecção de duas fontes pontuais muito próximas é um dos critérios de rejeição que nós usamos no cálculo dos índices morfológicos). Além disso, a estrela teria também que ser imperceptível no espectro do QSO. Com a concentração de estrelas da Galáxia a aumentar em direção ao plano Galáctico será de esperar que as PSFs dos QSOs de latitudes galáctica mais baixa sejam as mais afetadas.

Para avaliar essa possível contaminação por estrelas da Galáxia, verificamos o comportamento dos índices morfológicos, em função da latitude galáctica. Os 57893 QSOs classificados morfologicamente em todas as 5 bandas foram divididos em intervalos de 5 graus de latitude galáctica, e para cada intervalo calculamos a percentagem de objetos com pelo menos um dos três índices morfológicos ≥ 3. Os resultados obtidos para os filtros *ugriz* estão apresentados na Fig. 2.4. Podemos ver um claro aumento da percentagem de objetos "anômalos" em direção ao plano galáctico, e podemos ver também que os filtros associados a maiores comprimentos de onda são os que apresentam maior variação. Os índices calculados com as imagens no filtro u não apresentam variação com a latitude galáctica.

Considerando então que de fato as PSFs dos QSOs são perturbadas por estrelas da nossa Galáxia, seria de esperar que pelo menos parte das estrelas percebidas pelos índices morfológicos num dado filtro, sejam também percebidas nas imagens de um filtro de comprimento de onda próximo ao primeiro. Assim consideramos os objetos "anômalos" no filtro i mais os "anômalos" no filtro z e calculamos a fração de objetos que foram vistos como "anômalos" nos dois filtros em simultâneo. Esta fração foi determinada em dois

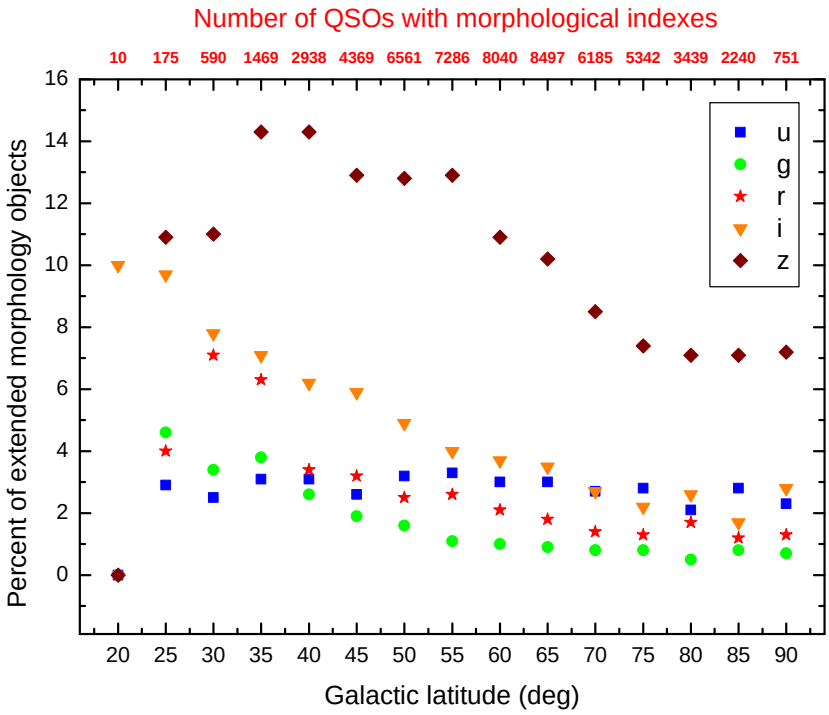

Figura 2.4: Distribuição da fração de QSOs com pelo menos um índice morfológico ≥ 3 para os filtros *ugriz* em função da latitude galáctica (em intervalos de 0.5).

intervalos de latitude galática diferentes, afastados entre si e que contivessem um número considerável de objetos. Para valores de latitude galáctica superiores a 70°, 9.88% dos QSOs são "anômalos" em i e z. No intervalo de latitudes entre 30° e 55°, a percentagem aumenta para 19.61%, aproximadamente o dobro, reforçando assim a hipótese das estrelas da Galáxia estarem a contaminar as PSFs dos QSOs. A maior contaminação por estrelas detectada nas bandas mais vermelhas seria compatível com a ideia de estrelas intrinsecamente fracas (com maior possibilidade de passarem despercebidas na fotometria e espetroscopia dos QSOs) terem picos de emissão nessas bandas. Por outro lado a extinção galáctica afeta mais os comprimentos de onda menores, isso "limparia" eventuais ténues contribuições de estrelas da Galáxia nos filtros azuis preferencialmente.

Apesar de Assafin et al. (2013) ter alertado para este problema das estrelas da Galáxia afetarem as PSFs dos QSOs, até à data ele tem sido bastante negligenciado pela comunidade. Pela primeira vez, obtivemos uma demonstração observacional que este efeito existe de fato e que ele não pode ser negligenciado. Ressalta-se que apesar de usarmos dados do SDSS que propositalmente não cobrem a área do céu mais próxima ao plano da

Galáxia, encontramos ainda assim uma assinatura significativa desse efeito até latitudes galácticas tão altas como $\sim 60°$ a $65°$. Este resultado é de extrema importância para a área de astrometria, em especial para a missão Gaia que observará o céu inteiro, incluindo o plano galáctico, onde obviamente é de esperar que esta contaminação seja muito mais forte. Lembrando que estas estrelas podem ter também movimento próprio, o que introduziria ainda mais incertezas nas medidas obtidas por Gaia. Estamos por isso a preparar já a publicação de uma *letter* com estes resultados.

Vimos então que os nossos índices morfológicos revelam contaminação das PSFs dos QSOs por parte das estrelas da Galáxia, vamos discutir agora na próxima seção se apesar dessa contaminação ainda podemos extrair alguma informação das características astrofísicas dos próprios QSOs.

2.5 PSFs perturbadas fora da Galáxia

Nesta seção vamos abordar a possibilidade dos QSOs com índices morfológicos "anômalo", terem as suas PSFs contaminadas por emissão da galáxia hospedeira, e discutir que tipo de informação podemos obter com os índices morfológicos sobre essas galáxias.

Do que vimos na seção anterior, é possível inferir que causas de perturbação das PSFs que não sejam extragaláticas podem adicionar ruído na interpretação astrofísica da natureza dos QSOs ou de suas hospedeiras, mas não podem explicar fortes evoluções em *redshift* observadas nos índices morfológicos.

A Fig. 2.5 mostra a percentagem de objetos, por intervalo de *redshift*, que revelam PSFs "anômalas" ou seja, com pelo menos um índice morfológico ≥ 3. No painel superior apresentamos as frações obtidas da análise das imagens nos 5 filtros *ugriz*, considerando todos os 57893 QSOs. No painel inferior, para evitar a contaminação por parte de estrelas da Galáxia, consideramos apenas os objetos mais afastados do plano da Galáxia, que têm latitude galática $> 60°$ ou $< -60°$. Os resultados, com e sem corte em latitude, apresentam uma forte correlação entre si com coeficientes de correlação de ~ 0.96. Isto sugere que a contaminação por parte de estrelas da Galáxia não afeta significativamente as conclusões sobre os QSOs, que se podem obter a partir dos índices morfológicos. Como podemos constatar, as fortes evoluções em *redshift* previamente notadas para os filtros u e z se mantêm, confirmando que estas são reais manifestações associadas a causas extragalácti-

cas, possivelmente dos próprios QSOs e ou suas hospedeiras. Podemos concluir também que apesar da contaminação por parte das estrelas da Galáxia, os nossos índices são ainda assim capazes de perceber essas propriedades. Para todos intervalos de *redshift*, os filtros *griz* são tendencialmente mais sensíveis a pertubações quanto maior o comprimento de onda associado, como de resto já tínhamos comentado anteriormente. Uma possibilidade levantada no início desta análise seria que a assinatura da galáxia hospedeira seria tendencialmente mais proeminente nas bandas mais vermelhas. Comparando as figuras vemos que a contaminação por estrelas da Galáxia, que é mais efetiva nos filtros mais vermelhos, parece amplificar as diferenças entre as distribuições observadas para os diferentes filtros, mas podemos ver à direita que apesar de mais próximas elas revelam tendências relativamente semelhantes às da figura da esquerda. Nota-se no entanto, uma mudança nos últimos intervalos de *reshift* em que o filtro g se torna mais sensível a perturbações da PSF que os filtros r e i.

Podemos ver (Fig. 2.5) que a forma das distribuições dos diferentes filtros não apresentam necessariamente uma correlação entre si, ainda que elas possam surgir ocasionalmente. Vários são os fatores que podem contribuir para que os diferentes filtros não revelem a mesma coisa nos diferentes intervalos de *redshift*. Primeiro, existem vieses de seleção na amostra, fazendo com que em diferentes *redshifts* não se veja necessariamente o mesmo tipo de objetos, como por exemplo o *Malmquist bias* que faz com que a amostra fique dominada por objetos cada vez mais luminosos à medida que o *redshift* aumenta. Segundo, ainda que observe objetos com as mesmas características, o que é visto por um filtro num *redshift* será observado num filtro diferente para um outro *redshift*, e os filtros têm diferentes respostas/sensibilidade o que pode levar a diferenças nos resultados. Terceiro, há o efeito da evolução cosmológica dos objetos, que faz com que uma mesma população apresente diferente características em diferentes *redshifts*.

Vamos agora abordar o comportamento dos índices morfológicos nos diferentes filtros, e discutir possíveis causas para os mesmos (ver Fig.2.5 embaixo). Os índices calculados com as imagens da banda z destacam-se consideravelmente dos demais, com um forte aumento da fração de "anômalos" até *redshift* ~ 1.5, diminuindo ligeiramente para depois aumentar de novo no último intervalo de *redshift*. Em *redshifts* mais baixos este filtro acessa uma parte do espectro óptico de comprimento de onda maior que a linha de H_α ($\lambda = 6563$ Å). Esta parte do espectro pode ter maior contaminação da galáxia hospedeira

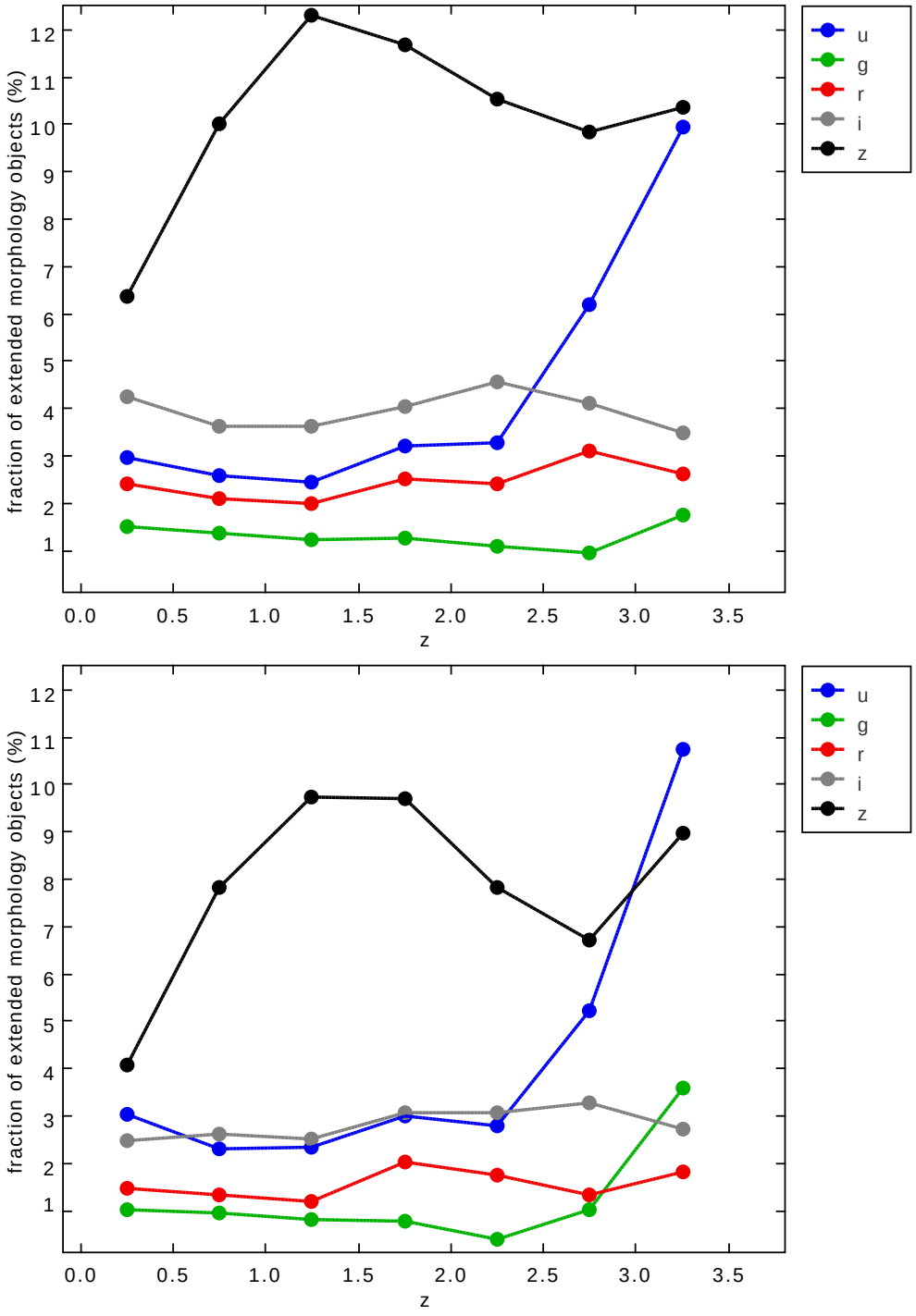

Figura 2.5: Distribuição da fração de QSOs com pelo menos um índice morfológico ≥ 3 para os filtros *ugriz* em função do *redshift* (em intervalos de 0.5). Em cima – Todos os 57893 QSOs com índices morfológicos calculados nas 5 bandas do SDSS. Embaixo – Agora apenas considerando QSOs com latitude galáctica $> 60°$ ou $< -60°$.

do que comprimentos de onda mais azuis mais dominados pela contribuição do AGN, tornando este filtro mais sensível a essa componente extensa da hospedeira. Até *redshift* $\sim 1.5-1.75$, este filtro vai acessando uma faixa de comprimentos de onda que vão passando pelo óptico até ao ultravioleta, e que vão cobrindo linhas de emissão do H_α até [OII] ($\lambda = 3727$ Å). Esta região do espectro é povoada por varias linhas normalmente fortes, como as da série de Balmer H_β, H_γ ou H_δ, e outras linhas como [OIII] ($\lambda = 5007$ Å) e o próprio [OII] ($\lambda = 3727$ Å). Estas linhas podem estar associadas à atividade AGN, mas também à atividade de formação estelar. Se no primeiro caso estas contribuiriam para a componente pontual do AGN, no segundo caso estas podiam estar a contribuir para a emissão da componente extensa, a da galáxia hospedeira. Assim, a fração de QSOs "anômalos" pode refletir a presença da galáxia hospedeira, e o aumento da fração de "anômalos" até *redshift* ~ 1.5 ser uma indicação de uma crescente formação estelar nas hospedeiras, uma vez que o filtro percebe uma porção do espectro cada vez mais azul, logo a componente extensa teria que ter mais emissão azul. Por outro lado esse aumento da fração de "anômalos" também se pode dever a efeitos de seleção da amostra, que podem estar a favorecer a observação de casos extremos de galáxias hospedeiras cada vez mais brilhantes e/ou com maior formação estelar.

Os filtros r e i apresentam variações muito pequenas na fração de "anômalos" por intervalo de *redshift*, com estas a não ultrapassarem valores da ordem de 0.5%. O filtro r revela um pequeno máximo da fração de objetos "anômalos" no intervalo $1.5 \leq z < 2.0$, sendo a parte do espectro acessada correspondente ao ultravioleta sem linhas de emissão muito fortes entre as linhas de MgII ($\lambda = 2798$ Å) e CIII] ($\lambda = 1909$ Å). A fração de QSOs "anômalos" observada no filtro i parece aumentar gradualmente até o máximo em $2.5 \leq z < 3.0$, onde acessa uma parte do espectro próxima à vista pelo filtro r em $1.5 \leq z < 2.0$, que inclui as linhas de emissão CII] ($\lambda = 2326$ Å) e CIII] ($\lambda = 1909$ Å).

A fração de QSOs "anômalos" no filtro u começa a aumentar para $z > 1.5$, onde começa a acessar à linha de emissão Ly_α, e revela um aumento muito expressivo de $\sim 3\%$ para $\sim 11\%$ a partir de *redshift* 2.5 onde acessa à parte ultravioleta do espectro que normalmente já é afetada pela absorção da floresta de Ly_α. O filtro g que para $z < 2.5$ revela frações de "anômalos" menores que 1% também revela um aumento a partir de *redshift* 2.5, onde acessa a linha de emissão Ly_α, parecendo até acompanhar a tendência do filtro u. No entanto, chamamos a atenção para o fato de que não se pode estabelecer

uma correlação direta do comportamento da fração de objetos "anômalos", observados nos dois filtros pelas razões que já foram referidas anteriormente.

Há dois fatos de grande relevância que se podem destacar nos resultados descritos acima. O filtro z parece detectar um número apreciável de objetos com componente extensa emitindo entre Hα e [OII] ($\lambda = 3727$ Å) até *redshift* ~ 1.5. E serem detectadas componentes extensas em vários objetos de alto *redshift* que se estiverem associadas ao QSO correspondem a emissão no ultravioleta, incluindo comprimentos de onda inferiores aos 1216 Å associados à linha Ly_α.

2.6 Galáxia hospedeira?

Vamos agora abordar a possibilidade dos índices morfológicos revelarem de fato a presença das galáxias hospedeiras dos QSOs.

Qual seria a possibilidade de conseguirmos detectar assinaturas das galáxias hospedeiras nos índices morfológicos, até em alto *redshift* $\gtrsim 1.5$?

O brilho de superfície de uma galáxia corresponde à luminosidade por unidade de área, e é normalmente dado em unidades de magnitude por arcsec^2. O efeito conhecido como *surface brightness dimming* (Tolman 1930, 1934) afeta todas as fontes, e o brilho de superfície observado de uma dada fonte diminui com $(1+z)^{-4}$. Podemos ver na Fig. 2.6 uma representação do *surface brightness dimming* em função do *redshift*. Isto pode introduzir um viés observacional que favorece objetos mais compactos para *redshifts* mais altos (Phillipps, Davies & Disney, 1990). No caso extremo de estruturas compactas não-resolvidas, elas não são afetadas pelo *surface brightness dimming* (Calvi, et al. 2014). Por isso é perfeitamente possível que uma componente associada à galáxia hospedeira seja detectada pelos índices morfológicos em altos *redshifts*, com estes a verem objetos cada vez mais compactos e brilhantes. Esta hipótese ganha ainda mais força com o fato de Schramm et al. (2008) ter encontrado hospedeiras de quasares extremamente luminosas ($M_V \sim -25$) a (z$\sim$ 3), e de galáxias massivas ($> 10^{10}\ M_\odot$) e com formação estelar revelarem uma tendência para serem mais compactas com o aumento de *redshift* (Allen et al. 2017). Assim, por exemplo a diminuição que se observa (Fig. 2.5) na fração de QSOs "anômalos" no filtro z a partir de *redshift* ~ 1.5 deve ser causada mais provavelmente pelo fato deste filtro passar a acessar uma parte do espectro emitido no ultravioleta que

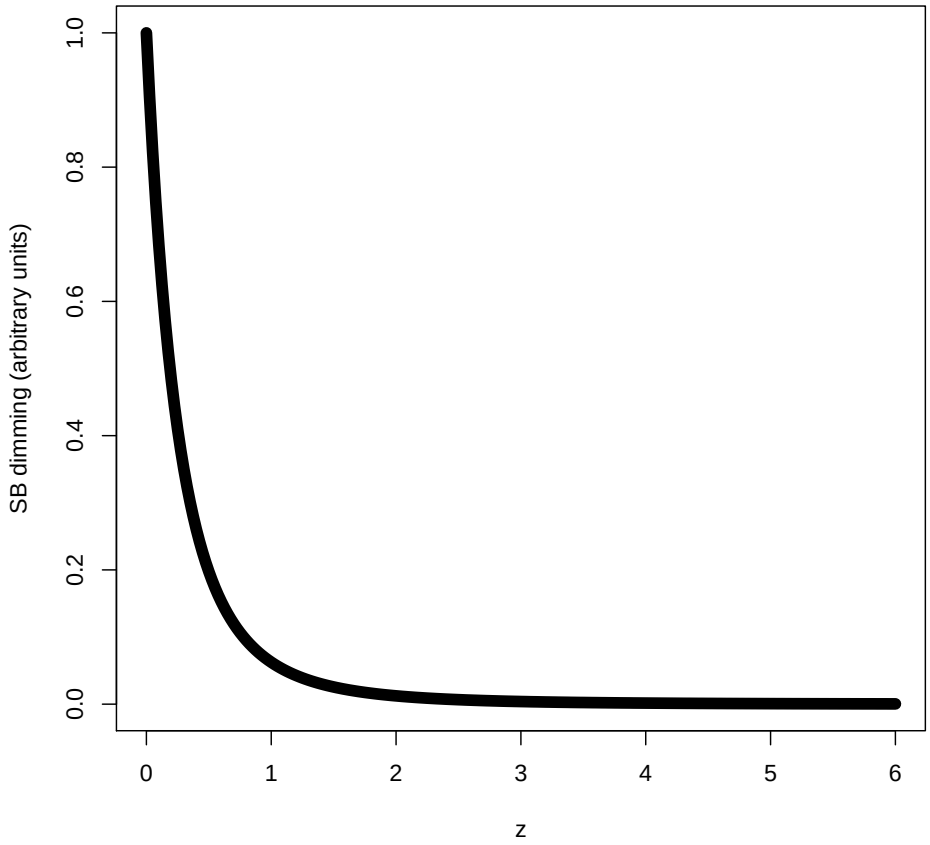

Figura 2.6: *Surface Brightness dimming* em função do *redshift*.

é dominada pelo AGN, e não tanto pelo efeito do *surface brightness dimming*.

O outro fato interessante notado nos nossos resultados, foi a detecção de emissão extensa, que seria correspondente a emissão UV no referencial em repouso dos QSOs, em fontes até z$\sim$ 3.

Uma possibilidade para explicar essa emissão no UV extensa que perturbe as PSFs dos objetos da nossa amostra, seria as galáxias hospedeiras serem dominadas por populações estelares muito jovens. No trabalho de Schramm et al. (2008) citado anteriormente, as hospedeiras de quasares a z$\sim$ 3 por eles resolvidas, além de extremamente brilhantes, possuem cores que indicam uma contribuição substancial de estrelas jovens. Isto mostra que tais hospedeiras existem de fato, e que seriam uma explicação válida para os nossos resultados.

Uma também possível fonte de perturbação da PSF no UV, seriam os chamados Ly_α *blobs* são estruturas de gás encontradas a alto *redshift* (z$>$ 2) no entorno de QSOs, ou

galáxias *starburst*. Eles possuem emissão Ly_α extensa, com dimensões que podem chegar a 100 Kpc, e luminosidades $Ly_\alpha \sim 10^{42} - 10^{44}$ erg s^{-1}. A emissão é associada a gás excitado pelo AGN ou por intensa formação estelar ou uma combinação de ambos (eg. Steidel et al. 2000, Yajima et al. 2013, Overzier et al. 2013).

Em fontes rádio a z$\geq$ 3 existe uma componente de luz azul e UV alongada e normalmente alinhada com o eixo da emissão rádio (Chambers 1987, McCarthy 1987). Segundo Vernet et al. (2001) esta emissão seria principalmente luz do AGN refletida pela poeira, e depois em menor proporção estrelas jovens, e emissão nebular. Contudo, as fontes referidas nestes trabalhos seriam associadas a AGNs de tipo II, enquanto que a nossa amostra é composta por objetos de tipo I, em que a orientação do eixo da emissão rádio é mais próxima à da linha de visada. Assim, por efeito geométrico, uma componente extensa de luz do AGN refletida por poeira talvez não seja tão forte nas nossas fontes, mas talvez possa ainda assim, ser uma causa adicional de perturbação da PSF de alguns QSOs.

Outra possibilidade para causar perturbações nas PSFs dos QSOs seria a existência de objetos extragalácticos próximos à linha de visada, mas em *redshifts* mais baixos, como por exemplo galáxias a baixo *redshift*. Ressaltamos que tais objetos teriam que obedecer a condições tais que a sua emissão na linha de visada do QSO não suplante a deste, uma vez que o espectro terá que ser dominado pela emissão do QSO, podendo ainda que apresentar algumas assinaturas menores do objeto interveniente, e não pode ser brilhante de modo a passar nos critérios de qualidade fotométrica aplicados no cálculo dos índices morfológicos.

York et al. (2012) procuraram, em 74000 espectros de QSOs do SDSS–DR5, por linhas estreitas de emissão Hα associadas a galáxias de *redshift* mais baixo que estivessem na linha de visada dos QSOs, e encontraram apenas 23 casos. Por outro lado, Finet et al. (2012) estimou que entre os $\sim$ 500000 QSOs que se pensa virem a ser detectados por Gaia, apenas cerca de 3000 (0.6%) sofreriam de contaminação de galáxias mais próximas que provocariam efeitos de lenteamento gravitacional, adaptando esses números para a área de cobertura do SDSS-DR7 estimamos que cerca de 750 objetos poderiam estar contaminados por galáxias intervenientes, destes o número poderia ser reduzido tendo em conta os critérios referidos no parágrafo anterior. Por outro lado, no caso de termos uma galáxia na linha de visada a perturbar a PSF de um QSO, seria de esperar que essa galáxia pudesse ser vista em algum outro filtro de comprimento de onda próximo, e o número de

objetos com índices morfológicos ≥ 3 em mais do que um filtro é muito baixo. Por tudo isto, achamos que galáxias intervenientes podiam explicar apenas um reduzido número de PSFs perturbadas que encontramos na nossa análise.

Damped Ly_α Absorption sytems (DLAs) são concentrações de hidrogênio neutro encontradas normalmente pela absorção de luz UV emitida por QSOs de fundo, com densidades de coluna N(HI)$\geq 2 \times 10^{20}$ cm^{-2}. Os DLAs são os maiores reservatórios de gás neutro no universo entre *redshift* 0 e 5, e em z$\sim 3-4.5$ eles continham massa suficiente para darem origem a uma fração significativa da massa estelar visível hoje nas galáxias do universo local (Wolfe, Gawiser & Prochaska 2005). Sabe-se que pelo menos alguns destes sistemas, estão associados a galáxias e num desses casos (a z=3.115), usando observações profundas feitas com o telescópio Subaru, foi até encontrada emissão Ly_α extensa (Kashikawa et al. 2014). Objetos como estes estudados em Kashikawa et al. (2014) podiam explicar perturbações nas PSFs de QSOs observadas em comprimentos de onda que corresponderiam menores que a linha de Ly_α no referencial do QSO. Posto isto, surge outra aplicação interessante da nossa análise de imagens de QSOs feita com os índices morfológicos. Os objetos que revelam PSFs perturbadas podem ser bons candidatos de associações DLAs e galáxias, para constituírem alvos de estudos mais detalhados.

2.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma análise morfológica das PSFs dos QSOs do SDSS-DR7, mediante a utilização de índices morfológicos, que permitem fazer a comparação da PSF do QSO com a PSF estelar média obtida com estrelas da mesma imagem. Foram processadas imagens nos 5 filtros do SDSS *ugriz* correspondentes aos 105783 objetos do catálogo de Schneider et al. (2010), num total de mais de meio milhão de imagens. Por causa da diferente sensibilidade dos filtros do SDSS e por causa dos critérios de qualidade da fotometria, impostos no cálculo do índices morfológicos, não foi possível obter índices morfológicos para a totalidade dos objetos. Para 57893 QSOs ($\sim 54.7\%$) obtivemos índices morfológicos nas 5 bandas do SDSS. O comportamento dos índices morfológicos não depende da magnitude aparente dos objetos. A grande maioria dos QSOs revelam comportamento pontual para todos intervalos de *redshift*. Ainda assim, um número apreciável de objetos tem algum índice morfológico ≥ 3 implicando uma

PSF que se afasta do comportamento de uma fonte pontual. Os três índices morfológicos (SHARP, SROUND e GROUND) mostram-se independentes entre si. Os filtros vermelhos têm tendência a ser mais sensíveis a perturbações da PSF.

Encontramos uma dependência entre os índices morfológicos e a latitude galáctica com estes a aumentarem à medida que a latitude galáctica diminui. Isto revela o efeito da contaminação das PSFs do QSOs por estrelas intervenientes. Sendo essa contaminação visível até latitude tão altas como $|b| \sim 60^{o}$, concluímos que esse efeito é importante e que pode implicar uma degradação dos resultados obtidos por Gaia junto ao plano da Galáxia, sendo esta ainda mais grave no caso das estrelas em causa terem movimento próprio.

Vimos que os índices morfológicos revelam evoluções com o *redshift*, e que os filtros u e z são os que apresentam as maiores variações. Encontramos, entre as PSFs "anômalas", fortes assinaturas que sugerem a existência de emissão ultravioleta extensa no sistema QSO+hospedeira. Discutimos as evoluções em *redshift* dos índices, apresentando várias possibilidades associadas a diferentes propriedades de galáxias hospedeiras como, o tamanho, a luminosidade, a população estelar, ou emissão UV extensa associada a uma componente gasosa. Abordamos ainda a possibilidade de detectarmos outros objetos extragalácticos como por exemplo DLAs na proximidade de QSOs, através dos índices morfológicos. Não temos elementos suficientes para distinguir, eliminar, ou indicar qual seria, dentre as possibilidades associadas ao sistema QSO/hospedeira discutidas, a fonte de perturbação mais importante. É até provável que as perturbações das PSFs sejam manifestação de vários destes fatores em conjunto.

Em conclusão os índices morfológicos podem ser utilizados para avaliar a qualidade astrométrica das PSFs dos QSOs, ao mesmo tempo eles permitem-nos acessar informações sobre a astrofísica destes objetos. Aplicados a observações feitas pelos levantamentos do presente e do futuro, com possibilidade de acessar outros comprimentos de onda, variabilidade, ou outros regimes de luminosidade e/ou *redshift*, será possível detalhar mais estas discussões astrofísicas da natureza dos sistemas QSOs+hospedeiras. Isto permitirá trazer para este campo da astrofísica extragaláctica, que até agora só dispunha de informação detalhada para um reduzido número de objetos, e em muito menos casos para *redshift* superiores a 0.5, o poder da estatística que apenas grandes amostras oferecem.

Capítulo 3

LARGE QUASAR ASTROMETRIC CATALOG

Neste capítulo apresentamos um trabalho realizado no âmbito do presente doutorado, em colaboração com colegas do Observatório de Paris em França. Do trabalho resultou a publicação de um artigo na revista *Astronomy & Astrophysics* em 2015 (Souchay et al. 2015, A&A, 583, 75 – no anexo A). A nossa contribuição direta para este trabalho consistiu no cálculo das magnitudes e no cálculo de índices morfológicos.

3.1 LQAC – 3

A missão Gaia será capaz de reconhecer autonomamente QSOs com base num algoritmo neural de aprendizagem. No âmbito da preparação da missão, foi criado um catálogo inicial de QSOs (Gaia Initial QSO Catalog – GIQC; Andrei et al. 2011) contendo posições e dados astrofísicos para fornecer elementos para o treinamento inicial do algoritmo neural. Este catálogo está na base do projeto Large Quasar Astrometric Catalog – LQAC (Souchay et al. 2009, 2012, 2015).

O LQAC é uma compilação, por precisão e exatidão, de QSOs encontrados na literatura que inclui: um código de identificação da referência original, *redshifts*, magnitudes e fluxos, estimativas de morfologia e magnitudes absolutas. O trabalho realizado no âmbito do presente doutorado, diz respeito à terceira versão, o LQAC-3.

O LQAC-3 contém um total de 321 957 objetos, incluindo um pequena porção de outros tipos de AGNs (14128) e BLLac (1183), correspondendo a aproximadamente mais 70%

objetos do que os compilados no LQAC-2. A compilação resulta da identificação cruzada de 12 catálogos além dos derivados do SDSS, que corresponde à maior contribuição para a presente compilação. Na tabela 3.1 podemos ver a lista de catálogos e o número de objetos com que cada um contribui, e apresentamos também o número de objetos em comum com o SDSS.

Nome do Catálogo	Natureza	Nº de QSOs no LQAC-3	Nº de QSOs em comum com o SDSS
ICRF2	Rádio	3414	506
VLBA	Rádio	7213	951
VLA	Rádio	1858	356
JVAS	Rádio	2118	451
2QZ	Óptico	23660	3271
2df-SDSS LRG	Óptico	9058	1923
FIRST	Rádio	969	801
HB	Ópt.&Rádio	6720	2102
2MASS	Infravermelho	21884	18433
GSC2.3	Óptico	144508	113213
B1.0	Óptico	139192	111121
V&V	Ópt.&Rádio	79692	25191

Tabela 3.1: ICRF2 – Fey et al. (2015); VLBA – Fomalont et al. (2003); VLA – Claussen (2006); JVAS – Patnaik et al. (1992), Browne et al. (1998), Wilkinson et al. (1998); 2QZ – Croom et al. (2004); 2df-SDSS LRG – Angela et al. (2008); FIRST – Becker et al. (2001); HB – Hewitt & Burbidge (1993); 2MASS – Cutri et al. (2003); GSC2.3 – Lasker et al. (2008); USNO B1.0 – Monet et al. (2003); V&V – Véron-Cetty & Véron (2010).

O total de objetos do SDSS incluídos neste catálogo provêm de 3 diferentes fontes: o catálogo de quasares do DR7 (Schneider et al. 2010) que contem 105783 objetos, o catálogo de quasares do DR10 (Pâris et al. 2014) que contem 166583 objetos, e os que não constam nestes dois catálogos mas que foram reconhecidos como quasares do SDSS no catálogo de Véron-Cetty & Véron (2010). Tendo em conta que existem 16420 objetos em comum entre o catálogo do DR7 e o do DR10, e que são contabilizados apenas uma vez, o total de QSOs do SDSS presentes no LQAC-3 é de 262535 objetos, mais do dobro dos objetos do SDSS presentes no LQAC-2 (Souchay, et al. 2012).

A quase totalidade dos objetos novos incluídos no LQAC-3 e que não pertenciam ao LQAC-2 vêm do catálogo de quasares do SDSS-DR10 de Pâris et al. (2014). Este catálogo surge do levantamento BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*; Dawson et al. 2013) da terceira fase do SDSS (SDSS-III; Eisenstein et al. 2011). Um dos objetivos deste levantamento é medir o grau de aglomeração do meio intergaláctico a z$\sim$ (2.5), e

para tal vão ser usados QSOs. A seleção de alvos do BOSS foi desenhada para atingir uma densidade de 15 quasares a z$\geq$ 2.5 por grau quadrado (Ross et al. 2012). O catálogo de quasares de Pâris et al. (2014) é uma compilação de todos os quasares espectroscopicamente confirmados nos primeiros 3 anos de observações do BOSS (publicados no *Data Release* 10 do SDSS; Ahn et al. 2014). Os QSOs do SDSS-DR10 têm $M_i[z = 2] \leq -20.5$, pelo menos uma linha de emissão com largura a meia altura (FWHM) > 500 km s^{-1}. O catálogo tem no total 166583 quasares e destes 117688 têm z$>$ 2.15.

Entre a informação fornecida no LQAC-3 são fornecidas magnitudes absolutas e índices morfológicos, sendo esta a nossa contribuição direta para o LQAC-3.

3.2 Índices Morfológicos

A outra contribuição para LQAC-3 foi o cálculo de índices morfológicos (SHARP, SROUND e GROUND) para os objetos presentes no catálogo.

Os índices morfológicos foram já descritos no capítulo anterior, para o LQAC a única diferença relativamente ao procedimento usado no capítulo 2, é a origem das imagens.

A compilação do LQAC–3 contem objetos que não se encontram na área do céu coberta pelo SDSS, por isso neste trabalho usamos as imagens do Digitized Sky Surveys (DSS) para determinar os índices morfológicos. O DSS foi produzido pelo Space Telescope Science Institute, e baseia-se na digitalização de placas fotográficas obtidas no Oschin Schmidt Telescope em Palomar (Estados Unidos da América) e no UK Schmidt Telescope na Austrália. Analisamos imagens no filtros Johnson B, R e I, e foram determinados índices morfológicos para 146398 objetos. Juntando com os que já tinham índices calculados na versão LQAC–2, faz com que haja no total 291 903 objetos com índices morfológicos no LQAC–3. Para cada um dos 146398, foi encontrada pelo menos uma imagem boa, pelo menos um índice morfológico foi obtido. Para aproximadamente 59% destes foi possível determinar 9 índices morfológicos, ou seja o SHARP, SROUND e GROUND para cada um dos filtros B, R e I.

Na Fig. 3.1 (em cima) apresentamos o histograma dos QSOs que já apareciam no LQAC-2 e que têm os 9 índices morfológicos determinados. Essa amostra era dominada pelos QSOs do SDSS-DR7, os mesmo objetos que analisamos no capítulo anterior. Podemos ver que a maioria dos QSOs apresenta um comportamento pontual, mas que ainda

assim uma quantidade significativa apresenta PSFs perturbadas. Podemos ver também que os filtros mais vermelhos, tendem a ser mais sensíveis a perturbações da PSF. Estes resultados são muito semelhantes aos obtidos para os QSOs do SDSS-DR7 na análise apresentada no capítulo 2 (ver Fig. 2.2). O fato de obtermos resultados semelhantes para amostras que contêm praticamente os mesmo objetos, apesar de na análise usarmos imagens obtidas com instrumentação diferente, revela a consistência dos índices morfológicos para detectar perturbações reais das PSFs e mostra que os resultados não são devidos a problemas das imagens ou da instrumentação.

Na Fig. 3.1 (embaixo) apresentamos o mesmo tipo de histograma, mas desta vez para os novos QSOs no LQAC-3, que são dominados pelos QSOs do BOSS (Ross et al. 2012). Podemos ver, que tal como para os objetos do LQAC-2 (Fig. 3.1 em cima), a maioria dos objetos revela um comportamento pontual, mas uma quantidade significativa apresenta PSFs perturbadas. Mas quando olhamos para estes objetos que revelam as PSFs perturbadas, surge uma diferença relativamente ao resultado obtido para os do LQAC-2. Vemos que a banda mais vermelha I já não é a mais sensível às perturbações das PSFs, esse papel passou para o filtro R. Este resultado é muito interessante, no SDSS-DR7 a mediana do *redshift* era ~ 1.49, já no catálogo de QSOs do BOSS a maior parte dos objetos tem z$\geq$ 2.15 (Pâris et al. 2014). Isto sugere as PSFs deste objetos são contaminadas por componentes extensas mais azuis que as fontes de contaminação que vemos nas PSFs perturbadas dos objetos de *resdshift* mais baixo. Podendo significar hospedeiras com maior formação estelar e populações estelares mais jovens a emitir no ultravioleta, ou outros fatores, já discutidos na Seção 2.6 do Capítulo 2.

Como já foi referido os novos QSOs do LQAC-3 são do catálogo de Pâris et al. (2014) e estes têm uma distribuição com um pico em magnitude aparente $r \sim 21$, enquanto que edições anteriores nomeadamente o catálogo de Schneider et al. (2010) esse valor era $r \sim 19$. Fomos então testar se também nas imagens do DSS, a consistência dos resultados não era afetada pela degradação dos índices com o menor brilho aparente dos objetos.

Os mesmos índices morfológicos obtidos agora para as estrelas, revelam valores médios próximos de zero e desvios padrão de aproximadamente 0.9 para o índice SHARP, 0.7 para o SROUND e 0.8 para o GROUND, sendo só ligeiramente mais pequeno em I do que em B. Ressalta-se que os índices percebem as estrelas como sendo mais pontuais que os QSOs (apenas 0.27% das estrelas têm índice maior que 3). Também não se observa

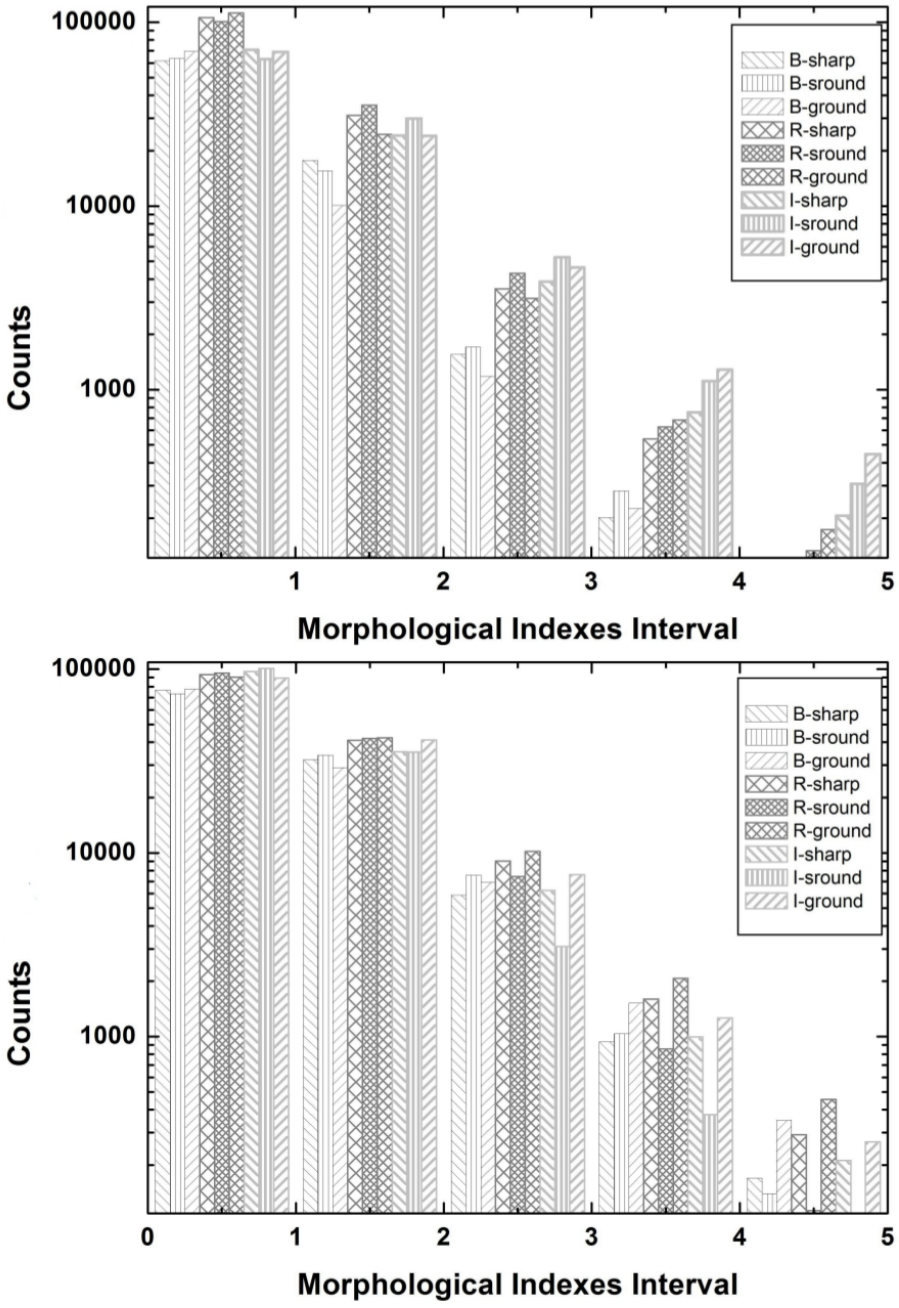

Figura 3.1: Histograma dos índices morfológicos para os QSOs que já pertenciam ao LQAC-2 (em cima), esta amostra era dominado por objetos do SDSS-DR7. Histograma dos índices morfológicos para os novos QSOs do LQAC-3 (embaixo), este conjunto é dominado pelos QSOs do BOSS. Os resultados dizem respeito apenas aos QSOs com os 9 índices morfológicos determinados, e estão apresentados em intervalos de 1. Dentro de cada intervalo aparecem 9 barras correspondendo a cada índice, e estão agrupados por filtro B (cinza mais claro), R (cinza mais escuro) e I (cinza intermédio).

nenhuma evolução, estatisticamente significativa, dos índices morfológicos das estrelas entre magnitudes $R = [9, 22]$. Ainda assim, vamos considerar uma abordagem para maximizar a confiabilidade dos nossos índices morfológicos.

Se em média as estrelas da imagem são mais brilhantes que o QSO, e se os índices são menos pontuais para magnitudes aparentes menos brilhantes, a diferença de magnitude entre estrelas e QSOs estaria a favorecer o aparecimento de QSOs com PSFs perturbadas. Uma maneira de acautelar a degradação de performance dos índices para o regime de magnitudes menos brilhantes, é usar um processo de treinamento lógico (Maehoenen & Hakala 1995). No nosso caso, isto pode ser feito usando as estrelas próximas e de magnitude aparente similar. Quando não são detectadas estrelas de magnitude aparente semelhante à do QSO podemos usar a distribuição de índices morfológicos em função da magnitude aparente, obtida para as estrelas da imagem, e extrapolar para as magnitudes semelhantes à do QSO. Isto faz baixar os valores dos índices morfológicos dos QSOs maximizando a confiabilidade dos mesmos.

Como já comentado anteriormente, os novos QSOs do LQAC-3 provêm do catálogo de quasares do SDSS-DR10 (Pâris et al. 2014) que contem quasares do SDSSIII/BOSS, e estes possuem *redshift* mais alto que a versão correspondente ao SDSS-DR7 (Schneider et al. 2010). Por isso a magnitude aparente dos novos objetos do LQAC-3 tem um pico em $r \sim 21$, enquanto que no LQAC-2 o pico era $r \sim 18 - 19$. O efeito de degradação dos índices para objetos menos brilhantes seria mais grave no caso dos novos QSOs do LQAC-3 do que nos do LQAC-2. Para fazermos o nosso teste, aplicamos o procedimento de treinamento lógico, aos novos objetos.

Na Fig. 3.2 comparamos os valores médios dos índices morfológicos obtidos para os objetos que já estavam no LQAC-2 com os correspondentes valores médios obtidos para os novos objetos do LQAC-3. Os novos QSOs são divididos entre os que também se encontram no PPMXL, e os que não. Sendo PPMXL um catálogo de posições, movimentos próprios, magnitudes no óptico e no infravermelho (2MASS quando encontradas), de 900 milhões de estrelas e galáxias, de céu inteiro, com a ambição de ser completo até aproximadamente magnitude V=20 (Roeser, Demleither & Schilbach 2010). Este foi utilizado para obter as magnitudes aparentes das estrelas e dos QSOs, quando os QSOs não estão no PPMXL este é usado para calibrar a fotometria do DAOFIND. Os novos objetos do LQAC-3 foram restringidos aos mais brilhantes que $R = 19$. As fontes no PPMXL

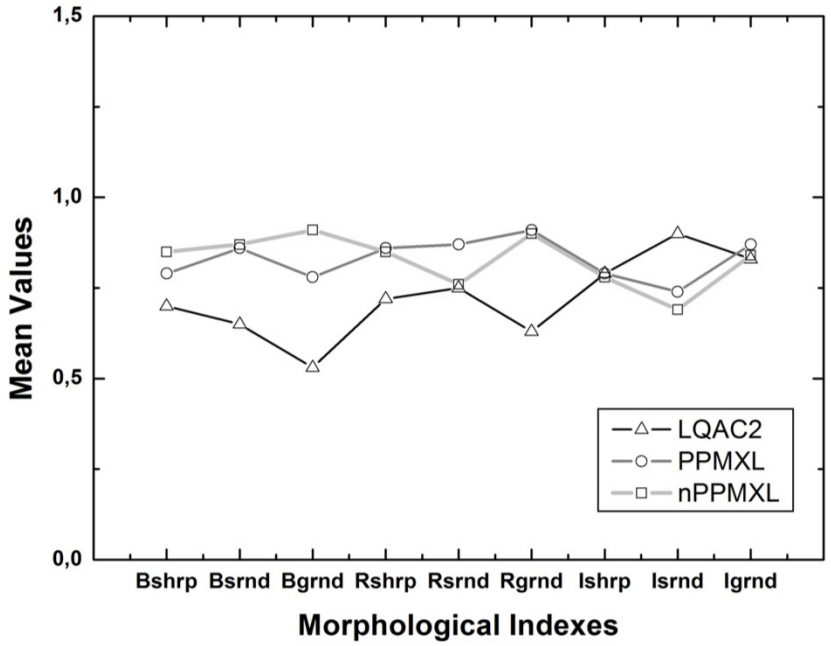

Figura 3.2: Valores médios dos índices morfológicos.(As barras de erro são invisíveis por causa do elevado número de elementos.) A linha com triângulos refere-se aos quasares que já apareciam no LQAC-2. A linha com círculos refere-se aos novos quasares no LQAC-3 que também são encontrados no catálogo PPMXL. A linha com quadrados refere-se aos novos quasares no LQAC-3 que não são encontrados no PPMXL. Foi aplicado um corte de magnitude, considerando-se apenas os objetos com $R < 19$.

são em média 0.85 mag (na banda R) mais brilhantes que as não-PPMXL, no entanto a correlação dos índices morfológicos é muito forte (sendo o coeficiente de correlação de 0.99), isto sugere que se deveria existir alguma diferença por causa da diferença de magnitude, ela desapareceu. Podemos ver que tantos os novos objetos como os já existentes no LQAC-2, têm na sua maioria um comportamento pontual, uma vez que os valores médios de todos índices são < 1 e têm valores próximos encontrados para as estrelas (referidos anteriormente). Podemos ver também que a maior sensibilidade dos filtros azuis para as PSFs mais perturbadas – manifestada aqui por médias ligeiramente superiores às dos mesmo filtros nos objetos do LQAC-2 – não é um efeito provocado pela menor magnitude aparente das fontes. Isto reforça o resultado da Fig. 3.1, discutido anteriormente, mostrando que ele está associado a propriedades reais dos objetos na amostra e não a uma degradação dos índices devido a menor brilho aparente das fontes.

Na Fig. 3.3 são apresentadas as distribuições dos valores médios dos índices morfológicos em função do *redshift*, apenas para os objetos do SDSSIII/BOSS que têm magnitude $R \leq 19$. Podemos ver que os valores médios dos índices morfológicos indicam que a maioria dos objetos tem comportamento pontual, refletido nos valores médios pequenos, em

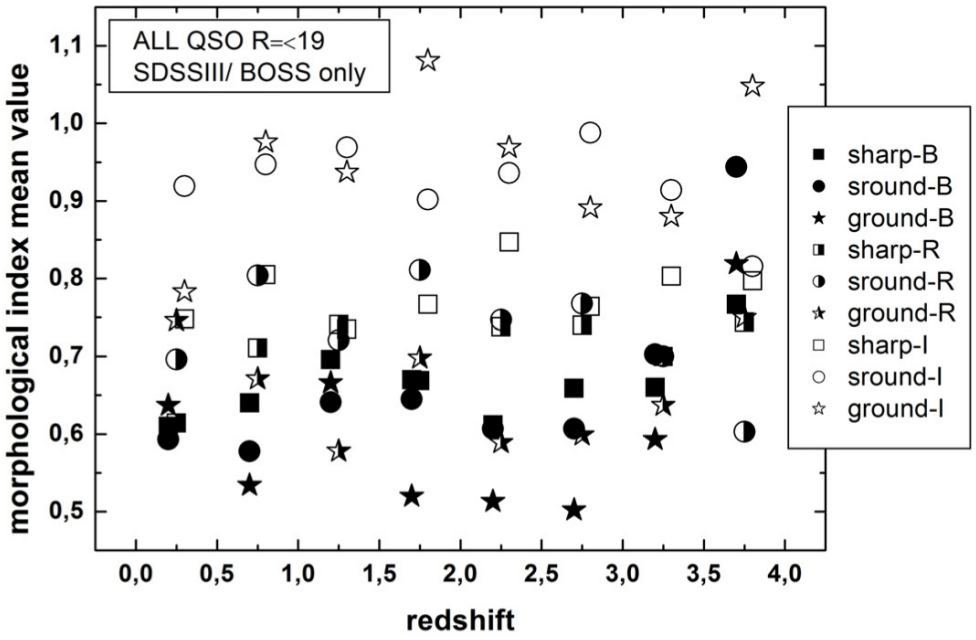

Figura 3.3: Distribuição dos valores médios dos índices morfológicos em função do *redshift*, com este em intervalos de 0.5. Consideramos apenas fontes com $R < 19$ para o cálculo das médias. Além disso, para evitar contaminação devido a diferentes critérios de seleção, foram apenas consideradas fontes do SDSSIII/BOSS. Os símbolos a cheio representam o filtro B, os símbolos semi-cheios representam o filtro R, e os símbolos vazios o I.

todos os intervalos de *redshift*. Estes resultados são semelhantes aos obtidos no Capítulo 2, para os QSOs do SDSS-DR7. Também é semelhante a tendência para os valores médios crescerem em função do comprimento de onda do filtro de B até I à semelhança também do obtido na análise do Capítulo 2. É interessante notar um crescimento dos índices morfológicos obtidos no filtro B para $z > 3$. O que pode estar relacionado com o aumento da percentagem de objetos com PSFs perturbadas nos filtros azuis do SDSS para os objetos do SDSS-DR7, também já comentado no Capítulo 2.

3.3 Magnitudes Absolutas

Uma das nossas contribuições para o LQAC-3 foi o cálculo de magnitudes absolutas. Foram calculadas magnitudes absolutas nas bandas B e I a partir das respectivas magnitudes aparentes já disponíveis baseadas em medições fotométricas do DSS e do SDSS disponibilizadas nos catálogos GSC2.3, PPMXL (Roeser, Demleither & Schilbach 2010), e no catálogo de quasares do SDSS-DR10. Nesta edição do LQAC-3 seguimos a mesma abordagem já utilizada no LQAC-2 (Souchay et al. 2012), sendo as magnitudes absolutas

caculadas a partir da expressao:

$$M = m + 5 - 5 \log D_L - A - K, \tag{3.1}$$

em que m é a magnitude aparente, D_L a distância-luminosidade (Hogg 1999), A a extinção galáctica, e K a chamada correção K que corrige o efeito do *redshift* na parte da SED acessada por um determinado filtro. Foram utilizadas correções de extinção Galáctica baseadas nos mapas de Schlegel et al. (1998), e as correções K de Richards et al.(2006) e Véron-Cetty & Véron (2006).

No presente doutorado desenvolvemos um método de calcular magnitudes absolutas de QSOs – que deu origem a um artigo (aceito para publicação, depois de serem feitas alterações) – em que usamos a biblioteca de espectros sintéticos Gaia (Claeskens et al. 2006) para efetuar a correção K, juntamente com correções adicionais para a floresta de Ly_α, e correção para o avermelhamento devido a poeira que possa existir na hospedeira do QSO. Remetemos o leitor para o Capítulo 5 desta tese, onde discutiremos em mais detalhe os pormenores dessa nova abordagem, e os resultados obtidos para os QSOs do SDSS-DR7 de Schneider et al. (2010).

3.4 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada uma análise morfológica das PSFs de QSOs do LQAC-3. Os índices morfológicos dos objetos do LQAC-3 que já constavam do LQAC-2, obtidos sobre imagens do DSS, são semelhantes aos obtidos no capítulo 2 para os QSOs do SDSS-DR7, com imagens do SDSS. No sentido em que a maioria dos objetos são pontuais e as bandas vermelhas tendem a ser mais sensíveis às PSFs "anômalas". Uma vez que o LQAC-2 é dominado pelos objetos do SDSS-DR7 podemos concluir que os resultados dos índices não dependem da instrumentação utilizada na obtenção das imagens.

Quando consideramos os novos objetos do LQAC-3, o comportamento relativo das bandas observado para índices morfológicos maiores mudou. Os filtros vermelhos já não são os mais sensíveis às perturbações. Isto sugere que os índices estão de fato a detectar perturbações das PSFs causadas por propriedades intrínsecas dos QSOs/hospedeiras, e evidência a capacidade de o fazerem para *redshifts* maiores a 2.15. O aumento da sensibilidade às PSFs "anômalas" das bandas mais azuis, sugere que as perturbações são

causadas por emissão em menor comprimento de onda, comparativamente às emissões responsáveis pelas perturbações das PSFs no LQAC-2 e SDSS-DR7, que se referem a *redshifts* mais baixos.

Também nas imagens do DSS os índices se mostram independentes da magnitude aparente dos objetos.

Finalmente, a maioria dos novos objetos do LQAC-3 apresenta comportamento pontual independentemente do *redshift*; assim como eram os objetos do LQAC-2.

Capítulo 4

MORFOLOGIA DA GALÁXIA HOSPEDEIRA

Parafraseando Sandage (1975), o primeiro passo para se estudar um qualquer tipo de objetos é uma classificação desses objetos. Uma das principais formas de classificação de galáxias é quanto à sua morfologia, e o diagrama de Hubble (1936; ver Fig.4.1) é o mais famoso esquema de classificação morfológica de galáxias, e serviu de base para as classificações mais modernas. Segundo este esquema as galáxias podem ser classificadas como elípticas (E), espirais (S) ou espirais barradas (SB). Adicionalmente a cada classe vem acompanhada de índices que acrescentam mais alguma informação morfológica. Nas elípticas os índices de 0 a 7 que indicam a elipticidade, sendo o 0 correspondente a isofotas de forma circular e o 7 corresponde a isofotas com elipticidade de 0.7. As espirais são acompanhadas de índices de (a) braços espirais enrolados de forma muito apertada, até (c) braços espirais mais afastados entre si. Entre as elípticas e as espirais Hubble criou uma classe intermediária S0 que teria a forma de disco mas sem braços espirais. Hubble pensava que as Galáxias evoluíam ao longo do seu diagrama de elípticas até se tornarem espirais ou espirais barradas, assim as primeiras são ainda hoje conhecidas por *early type* e as últimas por *late type*. Estes nomes mantiveram-se apenas por tradição, hoje sabemos que o cenário contrário é o mais provável, uma vez que as elípticas são vermelhas, dominadas por populações estelares velhas e com baixas taxas de formação estelar, enquanto que as espirais têm braços espirais azuis com populações estelares jovens e possuem taxas de formação estelar mais elevadas.

As classificações visuais de galáxias continuaram a evoluir e foram tornando-se mais

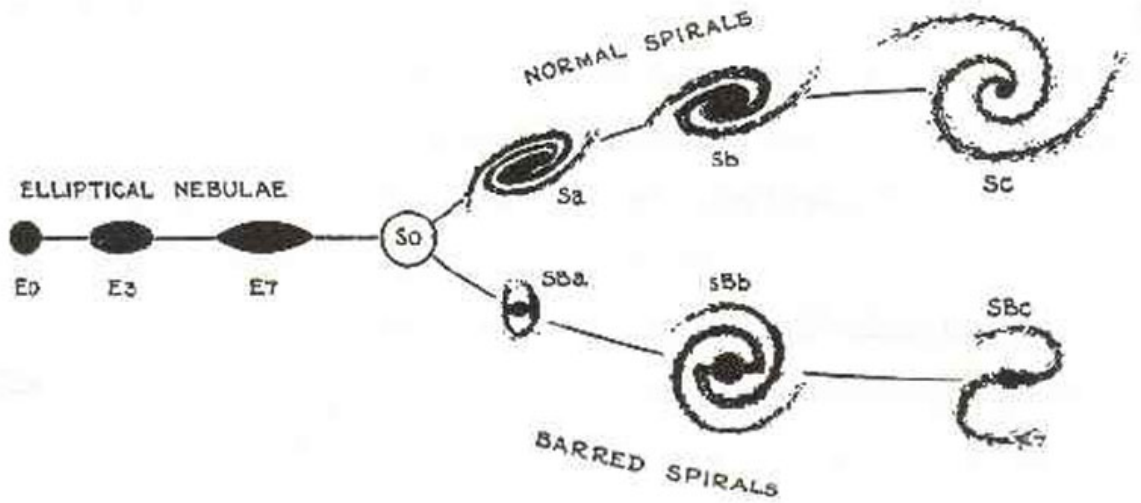

Figura 4.1: O famoso diagrama *tuning fork* de Hubble, para classificação morfológica de galáxias. (Hubble, 1936)

complexas a fim de incluírem, cada vez mais informação sobre as as galáxias (eg. de Vaucouleurs 1959, Sandage 1961). Mas com a quantidade de galáxias conhecidas e compiladas nos diversos catálogos a crescer, inspecionar imagens de milhões de galáxias tornou-se uma tarefa difícil de imaginar, até ao aparecimento do projeto *Galaxy Zoo* (Lintott et al. 2008). Este projeto usa a colaboração de cidadãos do mundo inteiro, para através de uma página na internet, inspecionarem imagens coloridas do SDSS, e classificando assim milhões de galáxias observadas pelo SDSS. Por outro lado Sérsic (1963) salientou a necessidade de quantificar a distribuição de luz das galáxias, e propôs uma forma de o fazer.

4.1 O perfil de Sérsic

O perfil de Sérsic (1963), é uma generalização do perfil de de Vaucouleurs (1948, 1959) $R^{1/4}$ sendo a intensidade do brilho I dada por:

$$I(R) = I_e \exp\left\{-b_n\left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/n} - 1\right]\right\}, \tag{4.1}$$

onde I_e é a intensidade efetiva no raio efetivo R_e que é o raio que contem 50% da luz, n é o chamado índice de Sérsic que dá a forma do perfil de luz, e bn é uma constante definida em termos do n. Quando n toma o valor 1 obtemos um perfil exponencial $R^{1/1}$ que descreve bem discos de galáxias espirais (Patterson 1940, de Vaucouleurs 1959, Freeman 1970).

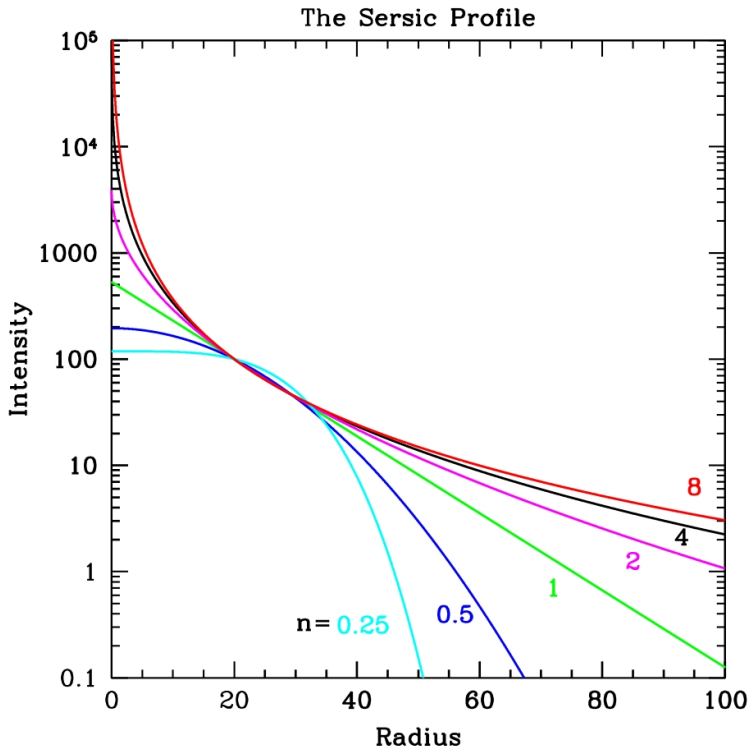

Figura 4.2: Representação de perfis de intensidade para vários valores do índice de Sérsic n. (Peng et al. 2010)

Quando n é 4 obtém-se o perfil de de Vaucouleurs (1948, 1959) $R^{1/4}$ que descreve bem galáxias elípticas e bojos de espirais. Os índices intermédios descrevem perfís de luz de galáxias com uma combinação de uma componente bojo e outra associada a um disco. O uso de apenas um perfil de Sérsic genérico pode ser útil para modelar galáxias cujas imagens não têm resolução suficiente para se distinguir as componentes bojo e disco (eg. Blanton et al. 2003). Na Fig. 4.2 podemos ver a representação de perfis de intensidade para vários valores de n.

4.2 Estratégia

Vamos agora descrever a estratégia usada por nós na obtenção de uma análise morfológica de galáxias hospedeiras de QSOs.

Nesta análise consideramos novamente os QSOs do SDSS–DR7 compilados no catálogo de Schneider et al. (2010), já utilizado na análise descrita no Capítulo 2. Nesse catálogo os autores classificam os QSOs em fontes pontuais e extensas, estando essa informação disponibilizada na coluna MFLAG do catálogo (MFLAG=0 indica fonte pontual, MFLAG=1 indica fonte extensa). Os QSOs são classificados como fonte extensa se a

diferença entre as magnitudes PSF[1] e model[2] na banda r forem superiores a 0.2 mag, os restantes são considerados fontes pontuais.

Para o que se segue consideramos os 4392 QSOs extensos (Schneider et al. 2010), mais 4392 pontuais (escolhidos aleatoriamente) para servirem de grupo de controle, totalizando assim 8784 QSOs. Lembramos também que as classificações morfológicas abordadas na introdução deste capítulo são válidas para baixo *redshift*, para altos *redshifts* as galáxias podem apresentar morfologias mais complexas como "clumps" ou formas irregulares associadas a fusões de galáxias que seriam mais comuns nessa época do Universo (Abraham 1999). Os 4392 objetos extensos escolhidos, são também apropriados para a análise morfológica que se segue, porque são na sua maioria objetos próximos com z médio ~ 0.43 e mediana ~ 0.36.

Analisamos as imagens do SDSS, obtidas nos 5 filtros *ugriz*, para cada objeto (dos 8784) num total de 43920 imagens, usando para isso o pacote ELLIPSE do IRAF, que permite ajustar isofotas elípticas às imagens de galáxias. A análise foi feita de forma automática em que a localização dos QSOs e de estrelas nas imagens, foram aproveitadas da análise feita para os índices morfológicos (ver Capítulo 2). Em cada imagem ajustamos o QSO e também algumas estrelas para controle dos resultados, o número de isofotas usadas no ajuste da distribuição de luz e a orientação delas foram deixados como parâmetros livres. Cada objeto na imagem foi ajustado com entre 10 a 15 isofotas que não excedem um semi-seixo maior de 15 pixels. A rotina vai calcular, para cada isofota, a elipticidade e que é dada por:

$$e = 1 - (b/a), \tag{4.2}$$

em que b é o semi-eixo menor, e a o semi-eixo maior. Se a e for zero corresponde a uma isofota circular. Depois, foi calculada a média dos valores de e das isofotas, tomando os quartis centrais (eliminando assim valores discrepantes), o valor obtido corresponde então à elipticidade da galáxia.

Os valores das intensidades, correspondentes à área dentro de cada isofota obtida pelo ELLIPSE, foram ajustados com um perfil de Sérsic. Os valores do índice de Sérsic tentados foram $n = \{0.5, 1, 2, 3, ..., 10\}$. O melhor ajuste é escolhido pelo método de mínimos

[1]Magnitudes do SDSS, mas adequadas para fontes pontuais como estrelas, em que o fluxo é calculado ajustando uma Gaussiana.

[2]Magnitudes do SDSS, mais adequadas a fontes extensas como galáxias, em que o fluxo é calculado ajustando as imagens 2-D, ou com um perfil de de Vaucouleurs, ou com um perfil exponencial.

quadrados, e o índice correspondente é então o resultado que nos permite descrever a morfologia da galáxia. O código para calcular o índice de Sérsic, foi testado em 3 imagens sintéticas, uma simulando um campo de galáxias, outra um campo de estrelas vistas por um filtro azul e uma simulando um campo de estrelas num filtro vermelho. Nos campos de estrelas obteve-se o índice de Sérsic mínimo (0.5), enquanto que para o campo de galáxias obtivemos índices com uma média e moda de 2.

4.3 Resultados

Do total de 8784 objetos analisados, foi possível calcular a elipticidade nas imagens dos 5 filtros para 890 ($\sim$ 10%). Destes, 742 são objetos classificados pelo SDSS como extensos, e apenas 148 são objetos pontuais. Estes números são o reflexo do fato de o ELLIPSE ter sido feito especificamente para ajustar isofotas de galáxias, e que tem mais dificuldade em ajustar fontes pontuais.

Na Fig. 4.3 estão apresentados os histogramas das elipticidades obtidas para os objetos extensos (em cima), e para os objetos pontuais (embaixo). Podemos ver que entre os filtros *griz*, os de maior comprimento de onda tendem a ser mais sensíveis a valores de e maiores. É possível ver ainda que o filtro u tem um comportamento de destaque, tendo uma resposta semelhante à do filtro z para elipticidades maiores. O comportamento revelado pelas elipticidades é semelhante nos dois conjuntos de objetos, com a maioria dos objetos a a apresentarem valores baixos. Mas isso não quer dizer que as causas dessas duas distribuições sejam as mesmas.

No caso das fontes extensas, a elipticidade obtida pode corresponder à valor intrínseco de galáxias elípticas ou pode indicar um efeito de projeção de galáxias disco. Elipticidades baixas podem indicar galáxias equivalentes aos Tipos E0 ou E1 de Hubble, ou podem ser galáxias disco, vistas numa direção perpendicular ao plano do disco (*face-on*). A valores altos de e corresponderiam galáxias disco vistas de perfil (*edge-on*), ou a elípticas com elipticidades grandes. No caso das galáxias discos, elas podem apresentar todo o tipo de orientações, logo não havendo orientação preferencial não seria de esperar uma distribuição de e preferencialmente baixas (Fig. 4.3). No caso das elípticas, o fato de as de menores valores de e (eg. E0 e E1) serem mais comuns que as eg. E7 (Sandage, Freeman & Stokes, 1970), poderia ajudar a explicar em parte a distribuição observada na Fig. 4.3.

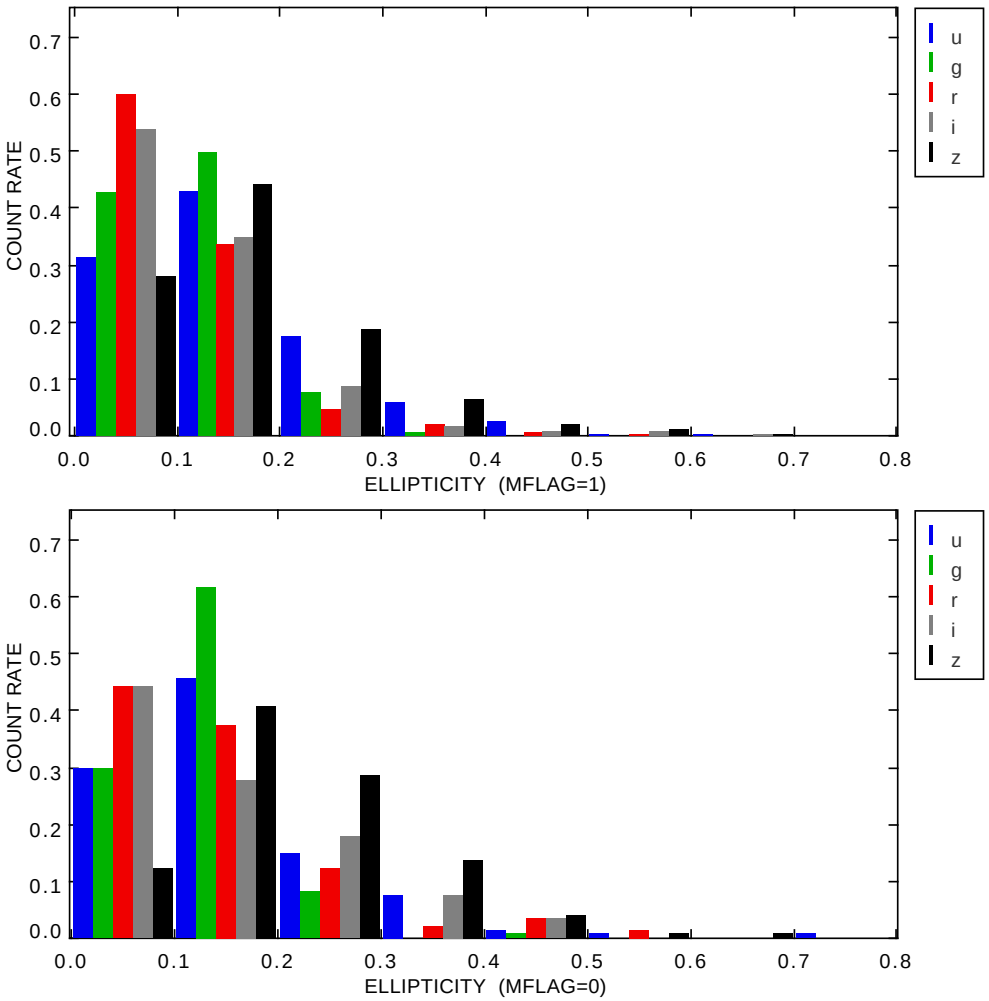

Figura 4.3: Histogramas da elipticidade consoante os diferentes filtros do SDSS *ugriz*. As contagens foram normalizadas, e apresentadas para intervalos de elipticidade de 0.1. Em cima – resultados obtidos para 742 objetos extensos. Embaixo – resultados obtidos para 148 objetos pontuais.

Lembramos que orientação da galáxia hospedeira não está relacionada com a orientação do AGN, que destingue os de tipo I e II. A distribuição das elipticidades também pode ser consequência de um efeito de seleção, provocado pelo método usado pelo SDSS para classificar os QSOs como extensos. As galáxias disco *face-on* e as elípticas E0 e E1 favorecem que a diferença entre magnitudes PSF$-$*model* seja maior, assim o método de classificação do SDSS pode estar a favorecer que mais destes objetos sejam incluídos no grupo dos extensos, em detrimento de elípticas E7 ou galáxias disco *edge-on*.

Por outro lado no caso das fontes pontuais (Fig. 4.3), é de esperar que PSFs tenham isofotas circulares, explicando porque a maior parte dos objetos pontuais apresentam elipticidades baixas. Sendo que os valores altos observados para alguns objetos pontuais talvez seja efeito de contaminação, por outras fontes.

Na Fig.4.4 mostramos a distribuição dos índices de Sérsic obtidos, para os 890 objetos com elipticidades determinadas nos 5 filtros do SDSS. A grande maioria dos objetos apresenta índice $n = 0.5$ ($\sim 93\%$ no caso dos objetos pontuais, e $\sim 90\%$ no caso de objetos extensos), por este motivo não apresentamos nos gráficos as contagens para $n = 0.5$ para facilitar a visualização dos demais valores.

No histograma relativo aos 73 objetos extensos com $n \geq 1$ (ver Fig. 4.4), é visível que a maior parte destes tem $n = 1$ e alguns apresentam $n = 2$. Não foi encontrado nenhum objeto com $n = 4$. Isto sugere uma predominância de galáxias disco entre as hospedeiras de QSOs, face a galáxias *late type*. Podemos ver uma tendência para os filtros vermelhos serem mais sensíveis aos índices $n \geq 1$. Mais uma vez podemos ver que o filtro u se destaca, com bastantes objetos (dentre os 73) a revelarem índices $n \geq 1$. Os diferentes filtros têm respostas diferentes, além disso vão ver diferentes porções da SED para um mesmo objeto, o que faz com que sejam sensíveis à emissão de diferentes populações estelares. Estes fatores explicam porque não vemos o histograma igual para todos os filtros.

Há apenas 11 objetos pontuais com $n \geq 1$ (na Fig. 4.4), devido ao pequeno número de objetos e pelo fato de serem objetos classificados como pontuais pelo SDSS, achamos que estes valores de índice de Sérsic não são realistas, resultando de alguma forma de contaminação. Esta ideia parece ser confirmada pelos exemplos das fontes pontuais que aparecem na Fig. 4.5, com os dois casos de elipticidades e índice de Sérsic não pontuais, a revelarem objetos muito próximos ao QSO.

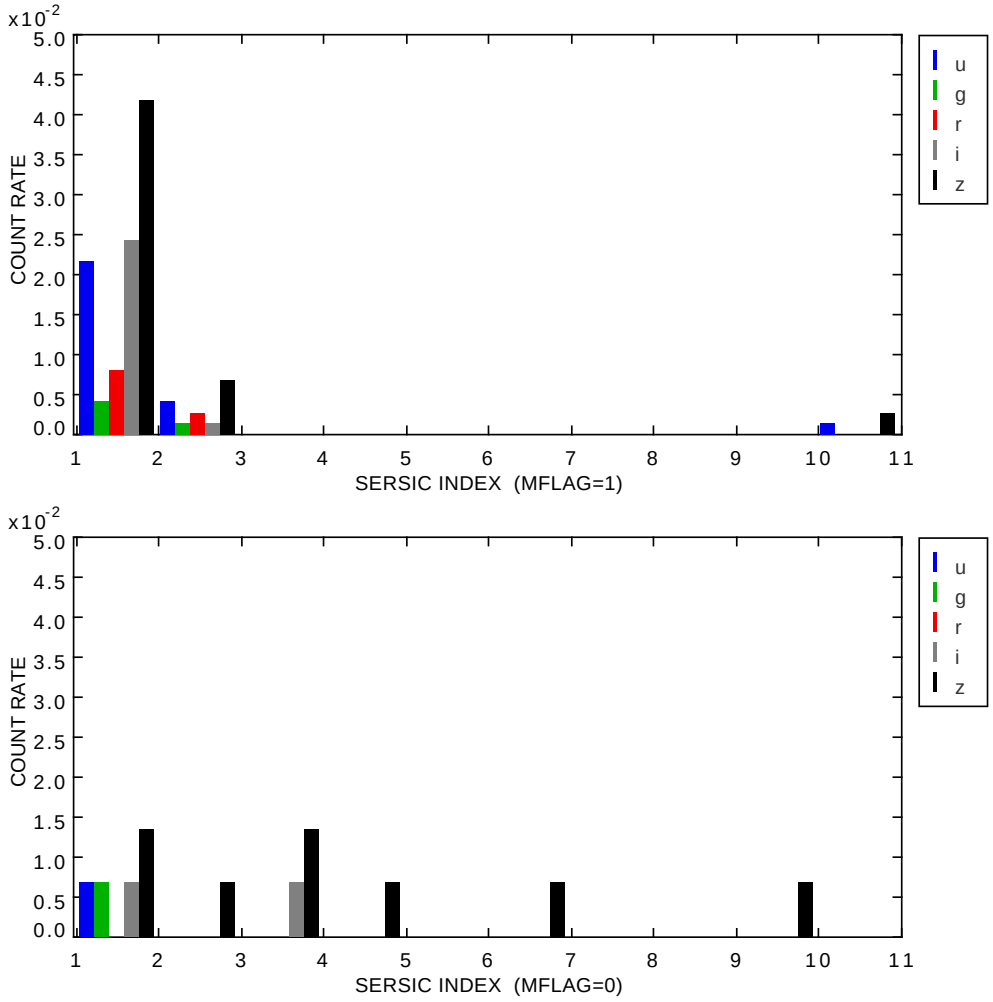

Figura 4.4: Histogramas do índice de Sérsic consoante os diferentes filtros do SDSS *ugriz*. As contagens foram normalizadas, e apresentadas para $n = 1, 2, 3, ..., 10$ (as barras estão sempre à direita do número n correspondente). Em cima – resultados obtidos para 742 objetos extensos. Embaixo – resultados obtidos para 148 objetos pontuais. Não apresentamos nos gráficos as contagens para $n = 0.5$ para facilitar a visualização dos demais valores, porque em ambos os grupos a grande maioria tem $n = 0.5$.

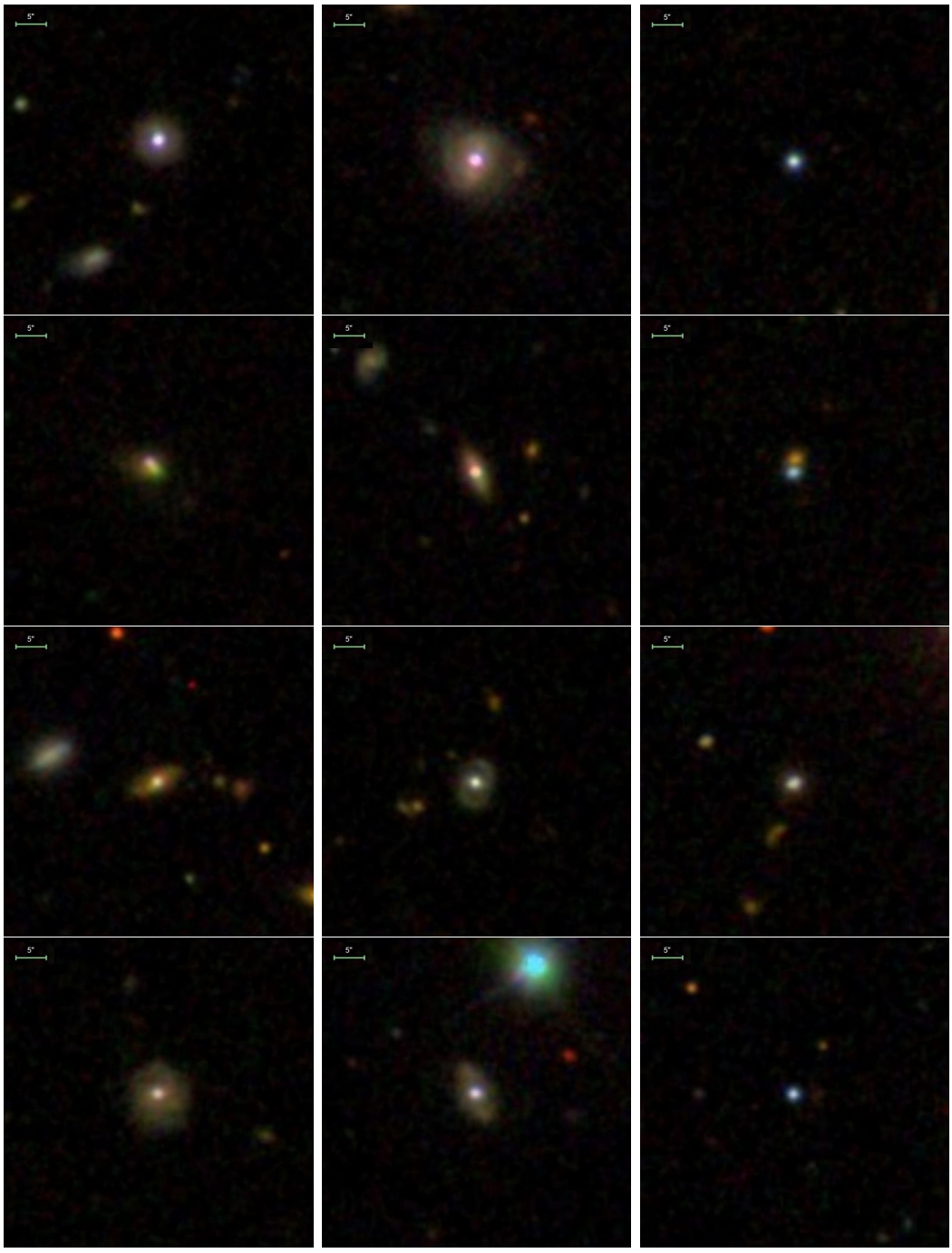

Figura 4.5: Imagens do SDSS resultado da combinação dos filtros g, r e i mostrando exemplos de QSOs classificados pelo SDSS como extensos (colunas da esquerda e do centro) e objetos classificados como pontuais pelo SDSS (coluna da direita). De cima para baixo: primeira linha - objetos com $e < 1$, segunda linha – objetos com $e > 3$, terceira linha objetos com $n = 1$, quarta linha – objetos com $n > 1$. (Todas as imagens estão à mesma escala de tamanho.)

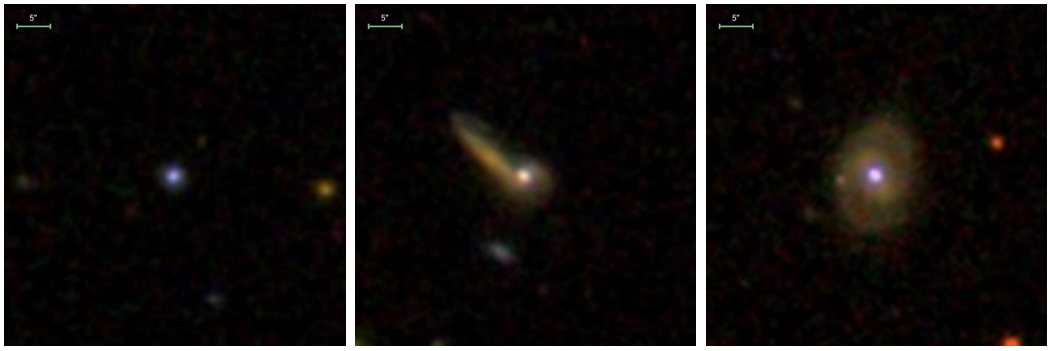

Figura 4.6: Imagens do SDSS resultado da combinação dos filtros g, r e i mostrando exemplos de QSOs classificados pelo SDSS como extensos e com $n = 0.5$. À esquerda – um exemplo de objeto que talvez o ELLIPSE tenha achado "pontual". Ao centro – exemplo de objeto com morfologia complexa. À direita – exemplo de uma galáxia espiral, não percebida com tal pelo nosso algoritmo, talvez por causa do maior tamanho angular na imagem. (Todas as imagens estão à mesma escala de tamanho.)

Podemos ver na Fig. 4.5 exemplos de QSOs classificados pelo SDSS como extensos, que o nosso algoritmo parece ter avaliado em consonância com a percepção visual. Em cima na primeira linha vemos objetos de baixa elipticidade, é perfeitamente visível que os objetos na segunda linha apresentam maior elipticidade. As linhas abaixo apresentam exemplos de objetos com índice de Sérsic $n = 1$ (na terceira linha) e $n = 2$ (na quarta linha). Podemos ver que entre as hospedeiras representadas surgem objetos com cores mais azuis que pode indicar formação estelar, e vemos também objetos mais avermelhados, o que pode significar a existência de poeira ou então ausência de formação estelar.

No entanto chamou-nos a atenção o fato, já mencionado nesta seção, de que para $\sim$ 90% dos objetos extensos terem sido obtidos índices $n = 0.5$, resultado muito semelhante ao encontrado para fontes pontuais. Por isso fizemos uma inspeção visual de imagens de várias fontes dentre as que eram extensas e tinham $n = 0.5$ nos 5 filtros. Destacam-se três tipos de situações das quais apresentamos exemplos na Fig. 4.6.

Há vários objetos extensos com $n = 0.5$ que têm uma aparência muito compacta, provavelmente o ELLIPSE não consegue distinguir muito bem estas fontes de fontes pontuais (eg. na Fig. 4.6 à esquerda). Também muitos objetos apresentam forma irregular, grande parte das vezes, claramente associados a colisões de galáxias (eg. na Fig. 4.6 ao centro), sugerindo que este tipo de morfologias passam despercebidas na nossa determinação do índice de Sérsic. Finalmente existem ainda vários com tamanho angular grande. Na Fig. 4.6 (à direita) podemos ver um exemplo claro de uma galáxia espiral. A escala desta imagem é a mesma das da Fig. 4.5 e é visível que esta galáxia tem tamanho an-

gular maior que todos os objetos extensos da Fig. 4.5, e estes por sua vez apresentam tamanhos angulares muito idênticos entre si. Apesar de o exemplo da Fig. 4.6 representar uma galáxia espiral, a inspeção visual das imagens destas galáxias de maior tamanho angular, revelou várias morfologias diferentes entre elípticas, espirais e irregulares. Isto sugere que mudando os parâmetros usados no ELLIPSE, como por exemplo aumentar o raio máximo (em pixels) até onde o ajuste pode ser feito, vamos provavelmente conseguir ajustar corretamente o n em mais casos.

Além das possibilidades que acabamos de mencionar, há um outro fato adicional que pode explicar encontrarmos tantos objetos extensos com $n = 0.5$. O índice de Sérsic que descreve uma fonte pontual é $n = 0.5$, e como os quasares são muito brilhantes em comparação com as hospedeiras, eles dariam uma contribuição importante na hora de ajustar as isofotas. As isofotas da PSF central associadas ao AGN podem estar a contribuir para que os valores do índice de Sérsic encontrados sejam em tão grande número iguais a 0.5. Mesmo assim, apesar da limitação que encontramos em termos do tamanho angular em que o ELLIPSE conseguiu bons ajustes, podemos fazer ainda assim algumas considerações sobre as morfologias das galáxias hospedeiras.

Os resultados do índice de Sérsic sugerem uma prevalência de galáxias disco face a galáxias elípticas. Fizemos também uma classificação das galáxias hospedeiras, nos 669 objetos classificados como extensos pelo SDSS e com índice de Sérsic calculado de $n = 0.5$, a partir da inspeção visual (já referida anteriormente) das imagens do SDSS. Consideramos que as hospedeiras podiam pertencer a 4 grupos: elípticas, disco/espirais, morfologia distorcida associada a colisões/interações, ou sem classificação. A maior parte das hospedeiras (513) foram consideradas sem classificação. Das restantes 156, 41 foram classificadas como espirais/disco, 38 como elípticas e 77 apresentavam claros sinais de colisão/interação entre galáxias. Estes números também apontam para uma predominância de discos face a elípticas, mas mostram que as galáxias com morfologias distorcidas (sinal de colisões/interações) são uma fração considerável. Lembramos que numa classificação por inspeção visual como esta, há sempre um fator de subjetividade associado, podendo ocorrer variações quando efetuada por outra pessoa. Ainda assim, podemos sempre obter indicações úteis deste tipo de classificação.

Os QSOs que o SDSS classifica como extensos estão predominantemente a baixo *redshift* e são de baixa luminosidade, eles não são luminosos o suficiente para ofuscar a

hospedeira. Juntando a informação obtida na análise com o ELLIPSE, à obtida com a inspeção visual das imagens, podemos dizer que entre as hospedeiras destes QSOs a baixo *redshift* e de menores luminosidades, que o SDSS classificou como extensos, existem galáxias hospedeiras irregulares como sinais de colisões entre galáxias, existem galáxias elípticas e galáxias disco/espirais. Assim os resultados revelados, estariam de acordo com trabalhos que a baixo *redshift* encontram também grandes frações de hospedeiras dominadas por discos como por exemplo o de Guyon, Sanders & Stockton (2006) que para uma amostra a z$<$ 0.3 encontrou $\sim$ 39% contra $\sim$ 36% de elípticas, ou o trabalho de Busch et al. (2014), 50% de galáxias disco numa amostra a z$\leq$ 0.06. Chamamos a atenção que estes resultados representam apenas uma sub-amostra a baixo *redshift*, eles não são necessariamente um reflexo de toda a população de QSOs do SDSS-DR7.

Finalmente vamos abordar a relação entre os índices morfológicos, referidos nos capítulos anteriores, e a classificação morfológica discutida nesta seção. Os índices morfológicos foram concebidos para medir alterações mínimas em PSFs e não para avaliar casos como os objetos que o SDSS classifica como extensos, em que a galáxia hospedeira é claramente visível. Os números atestam isso mesmo, dos objetos com algum índice ≥ 3 na banda u apenas 6.74% são classificados como extensos pelo SDSS, 6.94% na g, 7.40% na r, 7.40% na i e 6.94% na z. Vendo do outro prisma, dos 890 objetos que conseguimos ajustar com o ELLIPSE a fração de objetos em que os índices morfológicos sugerem uma perturbação da PSF varia (dependendo do filtro): entre 2.3% e 6.3% para fontes extensas segundo SDSS, e entre 0.6% e 4.9% para as fontes que pontuais. Como vimos nos capítulos 2 e 3 há sinais muito fortes de que os índices morfológicos são realmente capazes de perceber componentes extensas em sistemas QSO+hospedeira, ao mesmo tempo o ELLIPSE e a classificação morfológica do SDSS também mostram que são capazes de detectar a presença da hospedeira. O que estes números estão a refletir provavelmente, é que os diferentes métodos funcionam melhor em diferentes circunstâncias. Enquanto o ELLIPSE e a classificação do SDSS se mostram eficazes a baixo *redshift* para objetos em que a hospedeira é claramente resolvida, os índices conseguem mostrar pequeníssimas alterações da PSF quando as galáxias hospedeiras são aparentemente imperceptíveis. Os seja, estes diferentes métodos complementam-se, e juntos são ferramentas valiosas para o estudo de galáxias hospedeiras de QSOs.

4.4 Conclusões

Neste capítulo procedemos à análise da morfologia das galáxias hospedeiras dos 4392 QSOs classificados pelo SDSS como extensos. Foi utilizado o pacote ELLIPSE do IRAF para procedermos ao ajuste de isofotas das galáxias hospedeiras. Foram processadas ao todo 43920 imagens, correspondendo aos 5 filtros do SDSS *ugriz*, que contêm os 4392 objetos extensos mais outros tantos selecionados aleatoriamente para servirem com grupo de controle. O ELLIPSE conseguiu ajustar 890 objetos sendo que destes, 742 são classificados como extensos pelo SDSS e 148 pontuais.

Dos resultados da elipticidade vimos que os filtros associados a maiores comprimentos de onda têm tendência para perceber melhor os objetos de maior elipticidade. Vimos que a maioria dos objetos extensos apresentam baixos valores de elipticidade, à semelhança do encontrado para objetos pontuais. As razões para explicar esse fato são de natureza distinta nos dois grupos.

Os valores das intensidades, correspondentes à área dentro de cada isofota, foi ajustado com um perfil de Sérsic. Para os objetos pontuais os índices de Sérsic mostraram o resultado esperado, como a maioria com $n = 0.5$ e apenas alguns a apresentarem $n > 0.5$ resultado de contaminação por outras fontes muito próximas da linha de visada do QSO. Para 73 objetos extensos obtivemos $n = 1$ ou $n = 2$ (este em menor proporção que o primeiro) o que corresponde a valores típicos de galáxias dominadas por componentes disco. Não obtivemos $n = 4$, valor típico de galáxias elípticas para nenhum objeto. Para os restantes 669 objetos extensos, obtivemos $n = 0.5$ (resultado semelhante ao encontrado para as fontes pontuais). Foi feita uma inspeção visual de imagens do SDSS destes 669, e concluímos que o ELLIPSE não ajustou corretamente os objetos com maior tamanho angular. Para 76.7%, deste objetos cujas imagens foram inspecionadas visualmente, consideramos que possuem morfologia indeterminada. Muitos (77) apresentam morfologias distorcidas, que evidenciam colisões e/ou interações com outras galáxias. Foram ainda classificadas como disco/espirais 41, e 38 como elípticas.

Nossos resultados mostram que as hospedeiras dos QSOs de baixo *redshift* e menor luminosidade (presentes no SDSS-DR7), apresentam morfologias variadas, entre distorcidas devido a colisões/interações, elípticas e disco/espirais. Estas últimas predominam face às elípticas.

Os índices morfológicos foram desenvolvidos para detectar perturbações mínimas das

PSFs – potencialmente causadas por hospedeiras que são aparentemente imperceptíveis – equanto que a classificação do SDSS revela hospedeiras que surgem nas imagens perfeitamente resolvidas nas imagens. Esta diferença de propósito surge na falta de correlação entre os objetos assinalados pelos índices morfológicos como tendo PSFs perturbadas, e os objetos classificados como extensos pelo SDSS.

Capítulo 5

MAGNITUDES ABSOLUTAS DE QSOs

Neste capítulo apresentamos uma nova abordagem – que se pretende mais completa – para a determinação de magnitudes absolutas de QSOs, desenvolvida no âmbito do presente doutorado. Todos os detalhes, resultados e discussão são apresentados num artigo recentemente submetido à revista *Astronomy & Astrophysics* (recomendado para publicação após alterações).

5.1 Introdução

A magnitude absoluta constitui uma forma de medição da luminosidade intrínseca de um QSO numa dada banda de comprimentos de onda. É por isso uma quantidade crucial para estudar por exemplo: a função luminosidade dos QSOs (e.g. Richards et al. 2006; Ross et al. 2013), e relações QSO-hospedeira (e.g. Shen et al. 2008; Letawe et al. 2010; Rosario et al. 2013).

Habitualmente a magnitude absoluta M numa dada banda de comprimentos de onda pode ser calculada pela equação:

$$M = m + 5 - 5 \log D_L - A - K \tag{5.1}$$

onde m é a magnitude aparente, D_L é a distância-luminosidade em parsecs, A representa a extinção Galáctica e K, a chamada correção K (Oke & Sandage, 1968). Devido ao efeito do *redshift* na porção da SED observada num dado filtro, causados pela expansão

do Universo, é necessário usar a correção K para transformar a magnitude observada numa correspondente ao referencial em repouso. Esta correção K depende do filtro, do *redshift* e da SED do objeto. Uma das principais diferenças entre a nossa abordagem e as habitualmente adotadas na literatura é precisamente a maneira como lidamos com a SED dos QSOs.

Vanden Berk et al. (2001) determinam a correção K, assumindo uma lei de potência ($f_\lambda \propto \lambda^\alpha$) simples para aproximar o contínuo, em que o índice espectral $\alpha = -1.56$. Richards et al. (2006) usam uma lei de potência similar com $\alpha = -1.5$ para aproximar o contínuo, mas usam uma correção adicional para eliminar a contribuição das linhas de emissão na magnitude aparente na banda i do SDSS.

A correção K proposta por Wisotzki (2000) aproxima melhor os detalhes no contínuo e inclui a contribuição das linhas de emissão. O contínuo é estimado interpolando com uma spline cúbica a emissão de 25 QSOs (a baixo *redshift*), medida com filtros estreitos em bandas livres de linhas de emissão. A contribuição das linhas de emissão é adicionada depois seguindo Francis et al. (1991). Estas correções K são válidas até z$<$ 2.2, ou seja para objetos cujas magnitudes aparentes no ótico não estão afetadas pela floresta de Lyman alfa (Ly_α).

Há ainda trabalhos que usam abordagens que misturam as ideias dos trabalhos referidos anteriormente: Véron-Cetty & Véron (2010) usam uma lei de potência para o contínuo $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ com $\alpha = 0.3$ e incluem um correção adicional para incluir a contribuição das linhas de emissão tal como em Wisotzki (2000), mas incluindo uma correção para a floresta Ly_α que é dependente do *redshift*. Souchay et al. (2012) usaram as correções K de Richards et al. (2006) para o contínuo e as de Véron-Cetty & Véron (2010) para incluir as linhas de emissão.

A nossa abordagem é a seguinte:

- Nós consideramos duas componentes adicionais na Eq. 1,

  – uma relativa à extinção de fotons do UV que ocorre no meio intergalático que vai ser descrita na Sec. 5.2

  – outra relativa ao avermelhamento causado pela poeira da galáxia hospedeira do QSO e que vai ser descrita na Sec. 5.3.

- As magnitudes absolutas são obtidas considerando a SED dos QSOs individualmente

em vez de um conjunto discreto de correções K médias.

- usamos modelos de SED que têm em conta o contínuo com *blue-bump*, e que incluem a contribuição das linhas de emissão, com a vantagem, em relação aos trabalhos citados anteriormente, que nós estamos a considerar diferentes índices espectrais juntamente com diferentes intensidades para as linhas de emissão.

Para demonstrar o nosso método, e em continuidade às análises descritas nos capítulos anteriores, usamos o catálogo de quasares do Sloan Digital Sky Survey (SDSS) de Schneider et al. (2010) relativo ao sétimo *data release* do SDSS (DR7; Abazajian et al. 2009). O catálogo contém 105783 QSOs de tipo I confirmados espectroscopicamente, e já foi apresentado no capítulo 2. O catálogo contem, entre outras informações, *redshifts*, e magnitudes aparentes $BESTPSF$ nas 5 bandas do SDSS *ugriz* (Fukugita et al. 1996), que vão ser usadas no nosso cálculo de magnitudes absolutas. A contaminação de quasares com linhas de absorção largas (BAL) no catálogo é pequena, menos de 6% de acordo com Shen et al. (2011), por isso não vamos considerar nenhuma abordagem especial para este tipo de objetos.

As magnitudes aparentes do SDSS *ugriz* foram corrigidas da extinção Galáctica de acordo com os mapas de Schlegel et al. (1998). Também foram aplicadas correções para o desvio das magnitudes SDSS relativamente ao sistema AB[1] (Oke & Gunn 1983) ($u_{AB} = u_{SDSS} - 0.04$ e $z_{AB} = z_{SDSS} + 0.02$). Por isso, no que se segue deste trabalho referimos-nos a magnitudes no sistema AB.

5.2 Correções para a floresta de Lyman alfa

A floresta de Ly_α consiste numa série de linhas de absorção, que podem ser observadas no espectro de um QSO distante em comprimentos de onda mais curtos que o da linha de emissão Ly_α do QSO. Estas linhas de absorção são sobretudo linhas de ressonância Ly_α em diferentes *redshifts* (Lynds 1971), produzidas quando a luz emitida por um QSO passa através de nuvens intergaláticas de hidrogênio neutro (ver Rauch 1998 e referências lá contidas). As contribuições adicionais de metais e hélio para estas absorções são pequenas (Madau 1995).

[1] https://www.sdss3.org/dr8/algorithms/fluxcal.php#SDSStoAB

No caso do SDSS, a linha de emissão Ly_α é observada na banda u para os objetos com $z \gtrsim 2.2$. Por isso, o fluxo de QSOs com z> 2.2 poderá ter sido parcialmente absorvido pelo material intergaláctico que se encontra entre o observador e o objeto, e a banda mais afetada pela absorção depende do *redshift* do objeto. Assim, é necessária uma avaliação do impacto da floresta de Ly_α nas magnitudes aparentes, de forma a estimar melhor o fluxo intrínseco dos QSOs.

Meiksin (2006) obteve correções para as magnitudes de objetos a alto *redshift* (galáxias *starburst*, QSOs tipo I e tipo II) devido à atenuação intergaláctica, através de modelos melhorados para descrever essa atenuação. Estas incluem propriedades mais realistas do material intergaláctico e outras transições de Lyman de ordem superior (Meiksin & White 2004), obtendo uma melhor concordância com as observações (e.g. Inoue et al. 2014).

Nós retiramos os valores das correções para as bandas do SDSS *ugri* das curvas de Meiksin (2006) referentes a QSOs tipo I. As magnitudes aparentes são corrigidas da absorção pela floresta de Ly_α subtraindo as correções de Meiksin (2006) das magnitudes aparentes (corrigidas previamente da extinção Galáctica). Não aplicamos as correções de Meiksin (2006) às magnitudes na banda z porque só são afetadas pela absorção da floresta de Ly_α quando z> 5.5, e o QSO com maior *redshift* na nossa amostra tem z= 5.461.

5.3 Correções à poeira intrínseca da hospedeira

Hopkins et al. (2004) usaram uma amostra de 9655 quasares do catálogo do SDSS DR1 (Schneider et al. 2003) com z< 2.2, e mostraram que o excesso de contagens na extremidade vermelha da distribuição de cores de quasares pode ser explicado por avermelhamento devido a poeira. Richards et al. (2003) haviam interpretado o excesso de contagens no vermelho como sendo o efeito devido à presença de poeira localizada no mesmo *redshift* do quasar, por essa razão Hopkins et al. (2004) assumiram a cor modal como sendo uma medida da cor intrínseca dos quasares (estatisticamente a moda é menos sensível à existência de uma cauda assimétrica na distribuição do que a média). A fotometria em 5 bandas, normalizada pela cor modal em função do *redshift* foi ajustada com diferentes leis de extinção: a da Pequena Nuvem de Magalhães (SMC), da Via Láctea, e da Grande Nuvem de Magalhães (LMC) e a de Gaskell et al. (2004). Os autores concluem que a lei da SMC é que dá a melhor descrição para o avermelhamento causado pela poeira

na galáxia hospedeira.

Hopkins et al. (2004) consideraram apenas quasares com *redshift* z< 2.2 porque para *redshifts* mais elevados a fotometria do SDSS é afetada pela absorção da floresta Ly_{α}. No nosso caso, depois de aplicarmos as correções de Meiksin (2006) para superar esse problema, é possível testar se o avermelhamento nas galáxias hospedeiras segue o mesmo comportamento para z> 2.2. Para os objetos com z< 2.2 usamos os valores modais dados por Hopkins et al. (2004).

De modo a testar se a nossa hipótese de estender o modelo de Hopkins et al. (2004) para *redshifts* z> 2.2 é válida, usamos uma análise de Monte Carlo das cores relativas (modal-observadas) para verificar se existe alguma correlação com o *redshift*. O procedimento seguido é:

- cada uma das cores relativas ($u-g$, $g-r$, $r-i$, $i-z$) foi dividida em três grupos em termos de *redshift*: o primeiro grupo (controle) corresponde a z entre 0.15 e 1.15, o segundo grupo (comparação) de z entre 1.15 e 2.25, o terceiro grupo (teste) com z entre 2.25 e 3.35.

- cada um dos grupos foi dividido em 22 conjuntos correspondendo a intervalos de *redshift* de 0.05.

- em cada grupo toma-se 100000 vezes a média de 11 elementos sorteados de entre os 22 possíveis, usando um algoritmo de Monte Carlo. Reposição é permitida, por isso um mesmo conjunto pode contribuir repetidas vezes para cada uma das médias.

- o teste consiste em comparar como os grupos de comparação e teste se comportam face ao grupo de controle. O resultado vem da média de 100000 comparações, no entanto a solução converge rapidamente, de forma que o resultado após 1000 comparações é aproximadamente o mesmo.

A média das diferenças, no sentido $(teste-controle)-(comparação-controle)$ são as seguintes: $\langle u-g\rangle = -0.0053\pm0.0315$; $\langle g-r\rangle = 0.0137\pm0.0071$; $\langle r-i\rangle = 0.0073\pm0.0046$; $\langle i-z\rangle = 0.0181\pm0.0066$. Face a diferenças tão pequenas, da ordem de menos de 0.01 mag, pode-se concluir que as cores relativas têm o mesmo comportamento para *redshifts* abaixo e acima de 2.2.

Para z> 3.4 o valor da moda não pode ser bem determinado devido ao pequeno número de objetos por intervalo de *redshift* (ver Fig.5.1). Como as diferenças entre as modas e

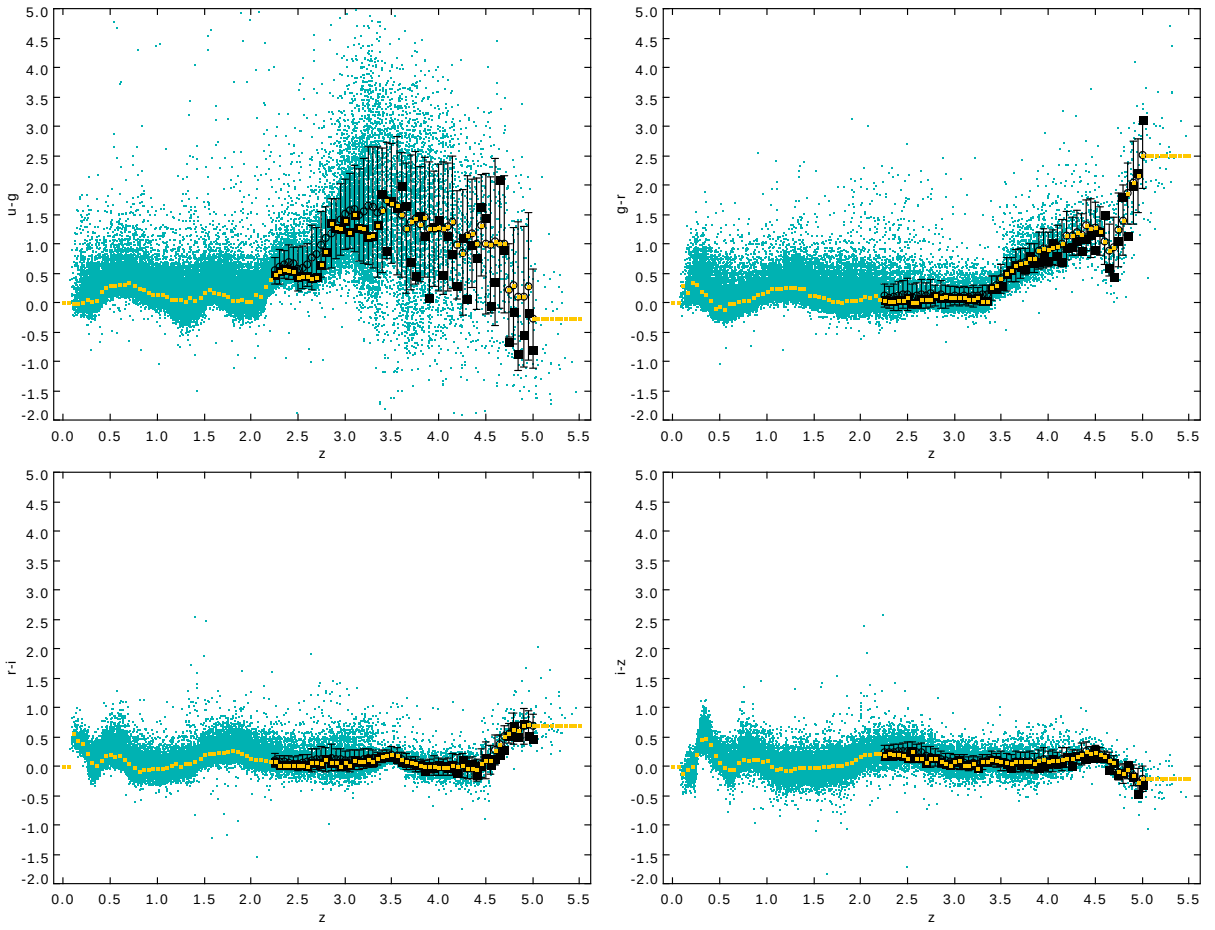

Figura 5.1: Cores observadas corrigidas da extinção Galáctica e da absorção da floresta de Ly_α, em função do *redshift* (pontos cinza). Os círculos vazios representam a média das cores, os quadrados pretos a moda e as barras de erro o desvio padrão por intervalo de *redshift* de 0.05. Os valores das cores intrínsecas são representados pelos quadrados laranja, para z< 2.2 correspondem aos valores modais de Hopkins et al. (2004). Em cima à esquerda – $(u-g)$, em cima à direita – $(g-r)$, embaixo à esquerda – $(r-i)$ e embaixo à direita – $(i-z)$.

as médias são da ordem do σ, adotamos a média como medida da cor intrínseca para estes objetos. Para z> 5 há tão poucos QSOs na nossa amostra que adotamos como valor intrínseco da cor a média do intervalo de *redshift* entre 4.95 e 5.

A estatística acima sugere que os fundamentos da abordagem de Hopkins et al. (2004) deverão continuar a ser válidos para *redshifts* mais elevados (z> 2.2). Note-se que alguns trabalhos propõem outras leis de extinção diferentes da SMC para objetos a altos *redshifts* (eg. Maiolino et al 2004, Gallerani et al. 2010) mas recentemente, baseando-se numa amostra de $\sim$ 35000 QSOs com *redshift* até 5.3, Krawczyk et al. (2015) concluiu que no geral a lei de extinção da SMC é a que dá melhores resultados quando se considera um grande número de objetos, e os nossos testes concordam com essa ideia.

O avermelhamento devido à poeira varia de direção para direção, o mesmo pode acon-

tecer se consideramos diferentes regiões da SMC, neste trabalho consideramos a lei de extinção da "barra" da SMC, que foi também usada por Hopkins et al. (2004). Para obter a extinção $A(\lambda)$ usamos a curva de Gordon et al. (2003), que dá $A(\lambda)/A(V)$ em função de $1/\lambda$. Os dados deles revelam uma forte correlação linear para um intervalo de comprimentos de onda entre 1160 Å e 21910 Å, sendo o melhor ajuste dado por:

$$A(\lambda)/A(V) = 8200.477(1/\lambda) - 0.577, \tag{5.2}$$

com coeficiente de correlação $r > 0.99$. Esta equação foi usada para fazer uma extrapolação até $\lambda = 1091$ para se obter o valor de $A(\lambda)$ associado à banda u para *redshift* z> 2.25. Para determinar o valor de $A(\lambda)$, nós assumimos o valor médio de $R_V = 2.74$ correspondente à "barra" da SMC (Gordon et al. 2003), juntamente com a relação $R_V = A_V/E(B-V)$ (Cardelli et al. 1989). Aos objetos mais vermelhos que a cor modal, correspondem diferentes valores de $E(B-V)$ (Hopkins et al. 2004). Nós variamos o valor de $E(B-V)$ de 0 até 0.8 por passos de 0.05, obtendo um conjunto de diferentes valores de $A(V)$ e para cada um deles uma curva diferente $A(\lambda)$. A diferença entre a cor intrínseca e observada é ajustada com a diferença dos $A(\lambda_{cental}/(1+z))$ associados aos filtros envolvidos na cor referida, sendo $\lambda_{central}$ o comprimento de onda central do filtro (Gunn et al. 1998), escolhendo-se assim a melhor curva de extinção para cada QSO. Tal como Richards et al. (2003) e Hopkins et al. (2004), concluímos que a maioria dos objetos têm $E(B-V) \leq 0.05$. Finalmente, para os casos em que seja necessário, subtraímos os valores de $A(\lambda_{central}/(1+z))$ obtidos às magnitudes aparentes para as corrigir da extinção devido a poeira que existe na hospedeira do QSO.

5.4 Biblioteca de espectros sintéticos de Gaia

Um aspecto fundamental no cálculo de magnitudes absolutas que estamos a descrever neste capítulo é a biblioteca de SEDs correspondentes ao referencial em repouso dos QSOs. Nós usamos o conjunto de espectros *QSO-reg* para z= 0 disponíveis publicamente na biblioteca de espectros sintéticos de Gaia[2], que é descrita em Claeskens et al. (2006). Estes espectros foram obtidos usando uma técnica de *template* modificada. Primeiro um espectro composto é obtido baseado na média de espectros observados, depois é subtraído

[2]https://www.sc.eso.org/∼asmette/gaia/

um contínuo analítico, o resultado é um espectro de emissão $E(\lambda)$. Este espectro de emissão é então multiplicado por um fator β e é adicionado a um continuo analítico[3] $C(\lambda, \alpha)$, resultando num espectro final que pode ser descrito como:

$$I(\lambda) \propto [C(\lambda, \alpha) + \beta(W)E(\lambda)]. \tag{5.3}$$

O contínuo usado por Claeskens et al. (2006) é:

$$C(\lambda, \alpha) \propto \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\alpha} \exp\left(\frac{-\lambda_1}{\lambda} \right) \exp\left(\frac{-\lambda}{\lambda_2} \right) + 0.021 \right], \tag{5.4}$$

onde $\lambda_0 = 10500$ Å, $\lambda_1 = 240$ Å, e $\lambda_2 = 1250$ Å. O primeiro dos três termos dependentes de λ, que estão multiplicados uns pelos outros, é uma lei de potência com índice espectral α. Os outros dois termos permitem estender o intervalo de comprimentos de onda do contínuo ajustado, fazendo do modelo de Claeskens et al. (2006) uma melhor aproximação para ajustar o contínuo total emitido por um QSO.

O conjunto *QSO-reg* contém 315 espectros diferentes para z= 0, com o índice espectral (α) a variar de -4.0 até 3.0 por passo de 0.5, a para cada valor de α são dados vinte e uma intensidades diferentes para as linhas de emissão. Claeskens et al. (2006) identificam cada espectro pelo valor do índice espectral α e pela quantidade W que está relacionada com o fator β, e que basicamente representa a largura equivalente total de todas as linhas de emissão. De modo que, quanto maior for o W, maior é a intensidade das linhas de emissão. Na Fig. 5.2 mostramos alguns exemplos de espectros da biblioteca de espectros sintéticos Gaia, com diferentes valores de α e W. O contínuo analítico, que modela melhor uma maior porção da SED, juntamente com um conjunto de diferentes índices espectrais, é aliado à possibilidade de ter diferentes intensidades para as linhas de emissão. Esta condição permite modelar muito melhor a SED real dos diferentes QSOs do que usar apenas um lei de potência simples e um único índice espectral.

Os 315 espectros sintéticos, usados neste trabalho, cobrem o intervalo de comprimentos de onda entre 2500.5 Å e 10499.5 Å, com amostragem de 0.5 Å, enquanto os valores de $I(\lambda)$ são dados em unidades arbitrárias. Então, é necessário escolher para cada um dos QSOs qual o espectro mais adequado, e é preciso também determinar um fator de escala para

[3] O índice espectral deste contínuo não é necessariamente o mesmo do contínuo usado na subtração para obter $E(\lambda)$.

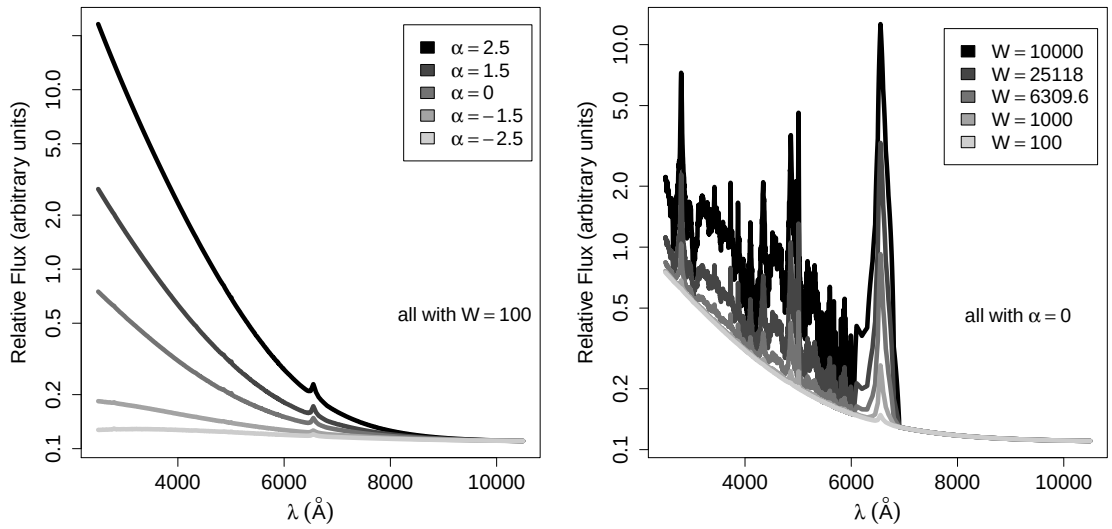

Figura 5.2: Exemplos de espectros da biblioteca de espectros sintéticos Gaia.

cada espectro. Na seção seguinte descreveremos como isso é feito usando as magnitudes aparentes, que já foram corrigidas dos efeitos de extinção e avermelhamento como vimos nas seções anteriores.

5.5 Calculando magnitudes absolutas

As magnitudes aparentes num dado filtro, corrigidas das extinções Galática, intergalática, e da hospedeira do QSO, são então usadas para calcular magnitudes absolutas M^*. Isto pode ser traduzido pela equação:

$$M^* = m + 5 - 5 \log D_L - A - A_{IG} - A_{host}. \tag{5.5}$$

De realçar que a Eq. 5.5 difere da Eq. 5.1, porque tem dois termos adicionais de extinção extragalática, e porque não tem correção K. Por causa da ausência da correção K, M^* refere-se a um intervalo de comprimentos de onda mais azul e mais estreito do que o intervalo de comprimentos de onda correspondente aos filtros em z= 0.

Para transformar as magnitudes M^* em magnitudes absolutas nos comprimentos de onda dos filtros do SDSS no referencial em repouso, é necessário conhecer a SED do QSO. É aqui que usamos a biblioteca de espectros descrita na seção anterior. Como vimos, os espectros da biblioteca não têm unidades definidas, mas isso não é necessário para calcular

cores. Então para cada espectro da biblioteca obtemos cores ($u^* - i^*$, $g^* - i^*$, $r^* - i^*$ e $i^* - z^*$). Note-se que estas cores envolvem uma transformação das janelas de comprimentos de onda dos filtros por forma a compensar o efeito do *redshift* ($\lambda_{emit} = \lambda_{obs}/(1+z)$).

Para cada QSO da nossa amostra é escolhido um espectro dentre os 315 da biblioteca para modelar a respectiva SED, usando o método dos mínimos quadrados para minimizar a diferença entre as cores ($u^* - i^*$, $g^* - i^*$, $r^* - i^*$ e $i^* - z^*$) e as cores ($M_u^* - M_i^*$, $M_g^* - M_i^*$, $M_r^* - M_i^*$, e $M_i^* - M_z^*$).

Depois de escolhermos o espectro que é o melhor modelo da forma da SED de um dado objeto, vamos atribuir-lhe unidades reais multiplicando-o por um fator de escala N. Portanto N relaciona a densidade de fluxo real (f_ν) com o modelo (f'_ν), sendo que $f_\nu = N \times f'_\nu$, em que f_ν é a densidade de fluxo a 10 pc em erg s^{-1} cm^{-2} Hz^{-1}. O fator de escala N_{filtro} é obtido, para cada filtro, considerando a equação do sistema AB (Oke & Gunn, 1983):

$$N_{filter} = 10^{(M^*_{filter}+48.6)/(-2.5)-\log f'_\nu}, \tag{5.6}$$

sendo o valor final de N calculado a partir da média dos valores de N_{filter}.

Finalmente, depois de atribuirmos unidades a um dado espectro sintético, este pode ser usado para se obter a magnitude absoluta final M_{filter}, em qualquer filtro cuja a janela de comprimentos de onda esteja entre os 2500.5 Å e 10499.5 Å do espectro sintético.

No caso dos objetos com z$>$ 1.27 apenas as bandas i e z podem ser usadas na escolha e calibração do espectro sintético, por causa do limite UV deste ser $\lambda = 2500.5$ Å. Assim, usamos a biblioteca de espectros sintéticos Gaia para os 41342 (39%) objetos com z$\lesssim$ 1.27 enquanto que para os objetos 64441 (61%) com z$\gtrsim$ 1.27 optamos por usar uma única *template* para a SED, em vez de escolhermos um espectro da biblioteca Gaia.

Para obtermos a *template* única usamos a *template QSO Type I* (QSO1) disponível na SWIRE[4] Template Library[5] (Polletta et al. 2007). A *template* QSO1[6] tem cobertura entre $\lambda = 1017.9$ Å e $\lambda = 6046$ μm. A cobertura extra no UV permite o uso das bandas u, g e r para *redshifts* superiores a ~ 1.27, contudo a amostragem (> 18 Å) é muito pior que a dos espectros sintéticos Gaia, por isso decidimos manter um espectro Gaia entre 2500.5 Å e 10499.5 Å. Verificamos que o espectro Gaia que ajusta melhor a *template* QSO1 é o

[4]Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Survey (http://swire.ipac.caltech.edu/swire/astronomers.html)
[5]http://www.iasf-milano.inaf.it/~polletta/templates/swire_templates.html
[6]A parte UV-ótico da QSO1 corresponde ao espectro composto do SDSS feito por Vanden Berk et al. (2001).

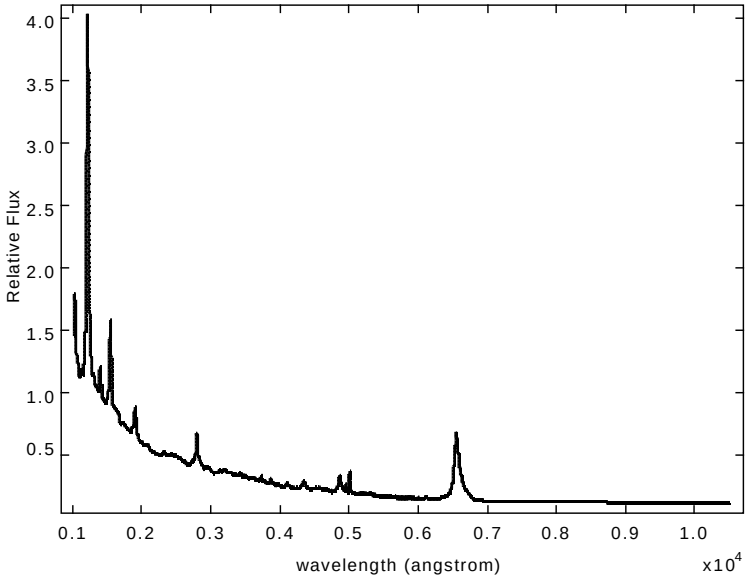

Figura 5.3: *Template* usada para $z \gtrsim 1.27$, construída com o espectro sintético Gaia ($\alpha = 0.0$, $W = 6309.5$) estendido no UV até $\lambda = 1017.9$ Å usando a *template* QSO1 do SWIRE.

que tem $\alpha = -0.5$ e $W = 6309.5$. A nossa *template* final formada por este espectro Gaia mais a extensão para $\lambda < 2500.5$ Å proveniente da *template* QSO1 pode ser vista na Fig. 5.3.

Os valores extremos de $|\alpha| > 2.5$ obtidos pelo nosso algoritmo para os QSOs do SDSS DR7 levaram a uma distribuição não muito realista para o índice espectral. A distribuição era razoavelmente suave e bem comportada com um valor modal em $\alpha = 0$, mas apresentava um pico em $\alpha = -4.0$ que não podia ser explicado. Acreditamos que isto pode ser um efeito da presença de linhas de emissão fortes nas cores usadas na escolha dos espectros. Com o aumento do *redshift* as linhas vão transitando para filtros com maior comprimento de onda associado. Considerando por exemplo a cor $i - z$, imaginemos que uma linha de emissão forte é observada na banda i num dado *redshift*. Pensemos agora, que num *redshift* apenas ligeiramente maior, essa linha passa a ser observada no filtro z. Esta transição da linha de emissão entre os dois filtros provoca uma mudança súbita nos valores da cor $i - z$ em função do *redshift*. A escolha do espectro não seria muito confiável nos *redshifts* onde ocorrem estas transições. Esta limitação poderá ser contornada com o uso de dados adicionais no infravermelho (eg. magnitudes nas bandas J, H e K) ou usando outra biblioteca de espectros com maior cobertura no UV. No entanto neste trabalho optamos por demonstrar nosso método usando apenas magnitudes do SDSS e os espectros da biblioteca Gaia. De acordo com isso, restringimos o intervalo

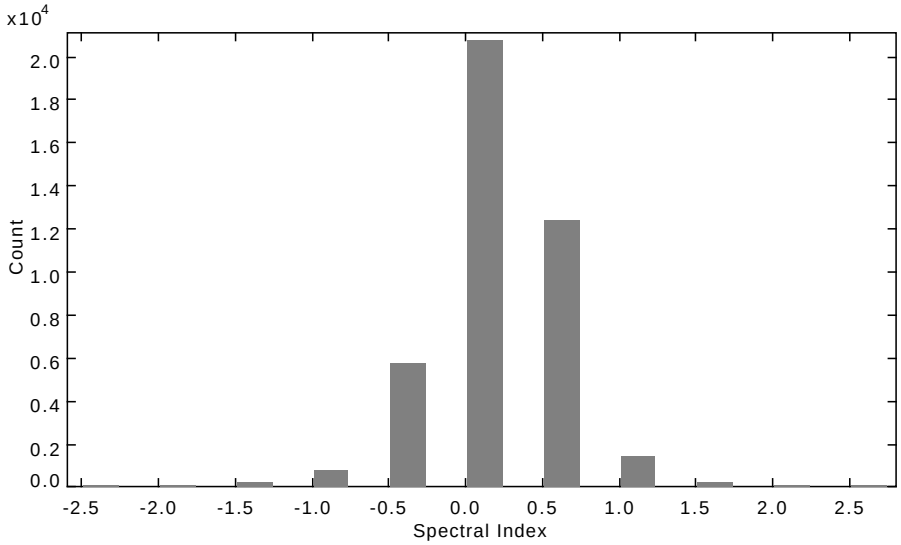

Figura 5.4: Distribuição final do índice espectral, para os objetos com *redshift* até $z \sim 1.27$.

de índices espectrais, removendo da biblioteca os espectros com valores $|\alpha| > 2.5$. O valor 2.5 foi escolhido como extremo do intervalo de índices espectrais por corresponder ao valor mínimo do corpo principal da distribuição inicial. A distribuição final para o índice espectral aparece na Fig. 5.4 e está em bom acordo com os valores comumente encontrados na literatura.

Por outro lado os valores de $W > 1\text{x}10^5$ também revelaram uma distribuição não realista tanto em *redshift* como em valor de magnitude absoluta. Notamos este problema pela presença de "picos" nas distribuições de magnitudes absolutas em função do *redshift*. Comparações feitas entre os objetos nos "picos" e outros no mesmo *redshift*, e com magnitudes aparentes similares, também mostram que os valores extremos de W não são razoáveis. Acreditamos que a causa disto é a mesma do problema detectado na escolha do α, descrita anteriormente. Por isso limitamos os valores de W, removendo da biblioteca os espectros com $W > 1\text{x}10^5$. Novamente, o valor limite ($W = 1\text{x}10^5$) foi escolhido por corresponder ao mínimo da distribuição de W. Na próxima seção comentamos como estes novos limites de α e W fizeram com que o nosso algoritmo escolhesse modelos razoáveis para a generalidade dos objetos.

5.6 Resultados e discussão

Como mencionado na seção 5.1 nós aplicamos o método, descrito neste capítulo, aos QSOs do SDSS-DR7. Nesta seção discutimos os resultados obtidos para essa amostra e

fazemos comparações com outras abordagens da literatura.

Depois de termos um espectro sintético escolhido e com unidades reais para cada um dos QSOs da amostra, podemos determinar magnitudes absolutas em qualquer filtro cujo intervalo de comprimentos de onda caia dentro da cobertura do espectro sintético (seção 5.5). No caso, calculamos as magnitudes absolutas nas 5 bandas do SDSS *ugriz*. Na Fig.5.5 as magnitudes absolutas M_u, M_g, M_r e M_z estão representadas em função do *redshift*, os resultados para M_i estão na Fig.5.6 juntamente com os valores de M_i calculados de acordo com Richards et al. (2006) e Schneider et al. (2010) para comparação. As distribuições de M_i e M_z apresentam pequenas "perturbações" negativas de objetos com magnitudes absolutas menos brilhantes por volta de $z \sim 0.7$ e $1.0 \lesssim z \lesssim 1.2$. Estas estão relacionadas com efeitos de seleção devido aos limites em magnitude aparente na banda i. Os *redshifts* onde linhas de emissão são observadas na banda i, tornam possível a seleção de objetos com contínuo mais fraco do que nos *redshifts* onde apenas emissão do contínuo cai na banda i. Estes efeitos de seleção são mais notórios nas bandas i e z, porque no referencial em repouso, estas bandas correspondem essencialmente a emissão do contínuo, uma vez que os QSOs não apresentam linhas de emissão fortes nesses comprimentos de onda. Note-se que os métodos que usam apenas uma lei de potência simples para modelar a SED, escondem esse efeito de seleção. A transição do regime em que escolhemos espectros sintéticos da biblioteca Gaia para o regime em que usamos o espectro único SWIRE+Gaia ($z \sim 1.27$) dá uma distribuição de magnitudes absolutas suave, mostrando que o uso de um único espectro é, neste caso, uma aproximação relativamente boa. Lembrando novamente, os ingredientes deste método não são únicos, o uso da biblioteca Gaia pode ser estendido até *redshifts* mais altos usando magnitudes aparentes no infravermelho (eg. J, H e K), ou podemos usar outra biblioteca de espectros com maior cobertura no UV.

A Fig.5.7 mostra o histograma da magnitude absoluta M_i comparando os nossos resultados com os obtidos de acordo com Richards et al. (2006) e Schneider et al. (2010). As nossas magnitudes M_i são em média 1.32 mag mais brilhantes do que as obtidas segundo Richards et al. (2006) e 1.06 mag mais brilhantes que as de Schneider et al. (2010). O desvio padrão (σ) do nossa distribuição de M_i é ligeiramente maior, 1.15 comparando com 0.93 e 0.85 respectivamente.

As diferenças entre M_i calculadas neste trabalho e as obtidas de acordo com Richards et al. (2006) e Schneider et al. (2010) são apresentadas em função do *redshift* na Fig.5.8.

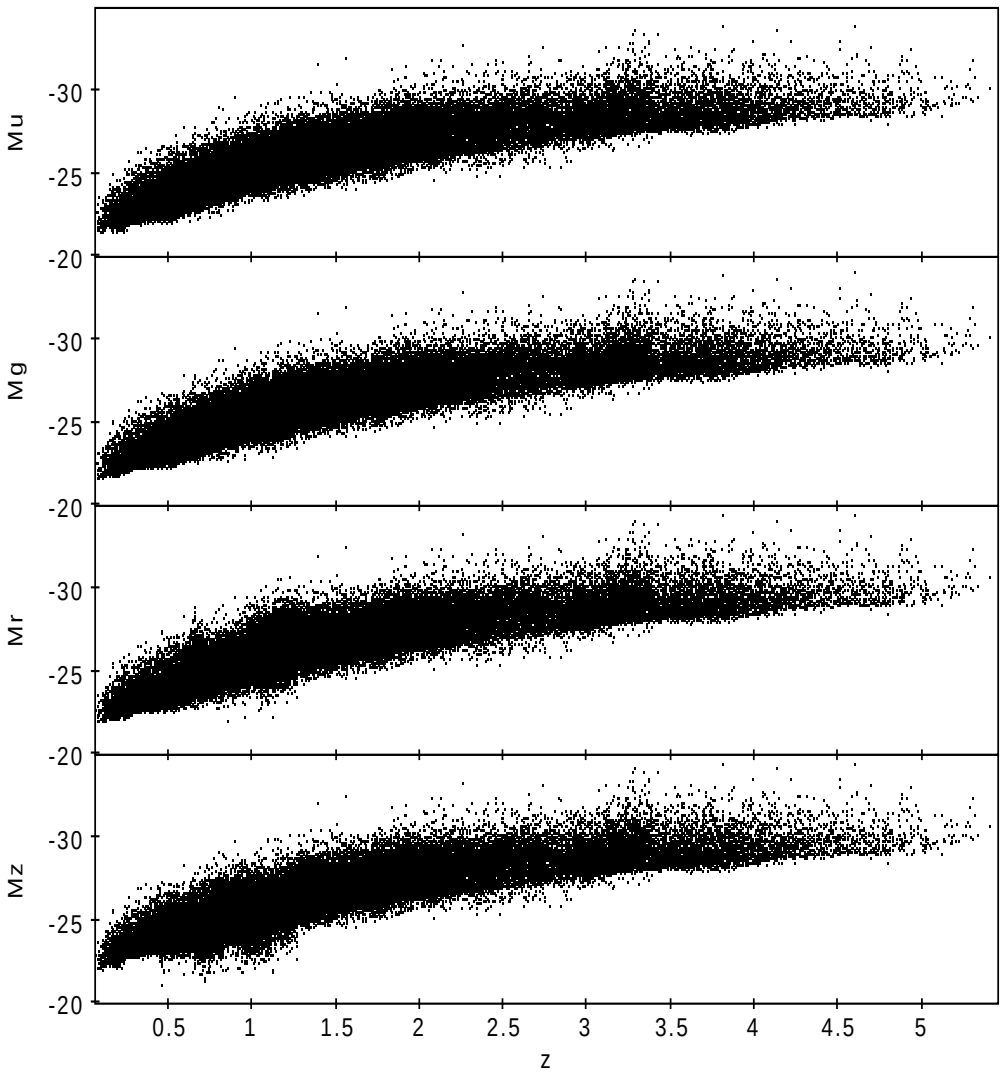

Figura 5.5: Magnitudes absolutas em função do *redshift*. De cima para baixo M_u, M_g, M_r e M_z.

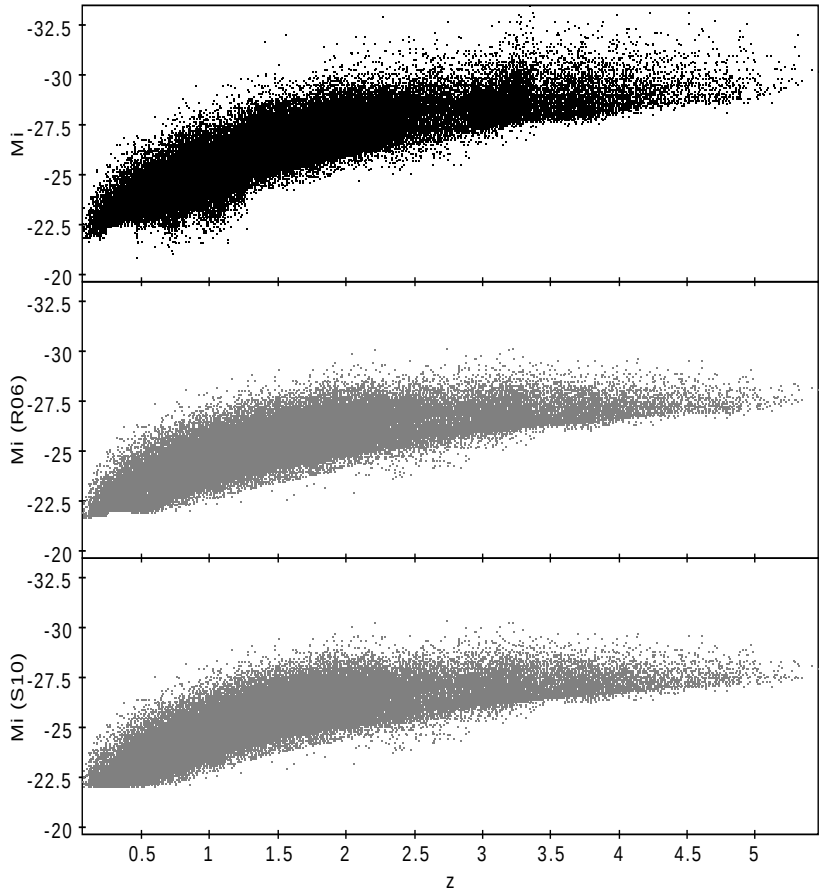

Figura 5.6: Magnitudes absolutas (M_i) em função do *redshift*. Em cima – Este trabalho. No meio – Magnitudes absolutas de Richards et al. (2006). Embaixo – Magnitudes absolutas de Schneider et al. (2010). O uso de uma lei de potência simples esconde efeitos de seleção. Ver texto para mais detalhes.

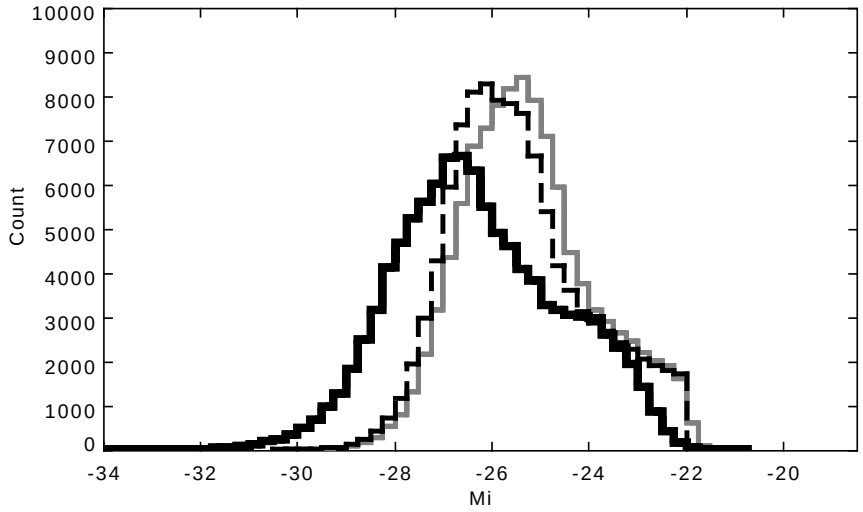

Figura 5.7: Linha contínua preta – Histograma da nossa magnitude absoluta M_i. Linha tracejada – Distribuição da magnitude absoluta de Schneider et al. (2010). Linha cinza – A distribuição da magnitude absoluta calculada de acordo com Richards et al. (2006). As nossas magnitudes são mais brilhantes e têm uma distribuição ligeiramente mais larga.

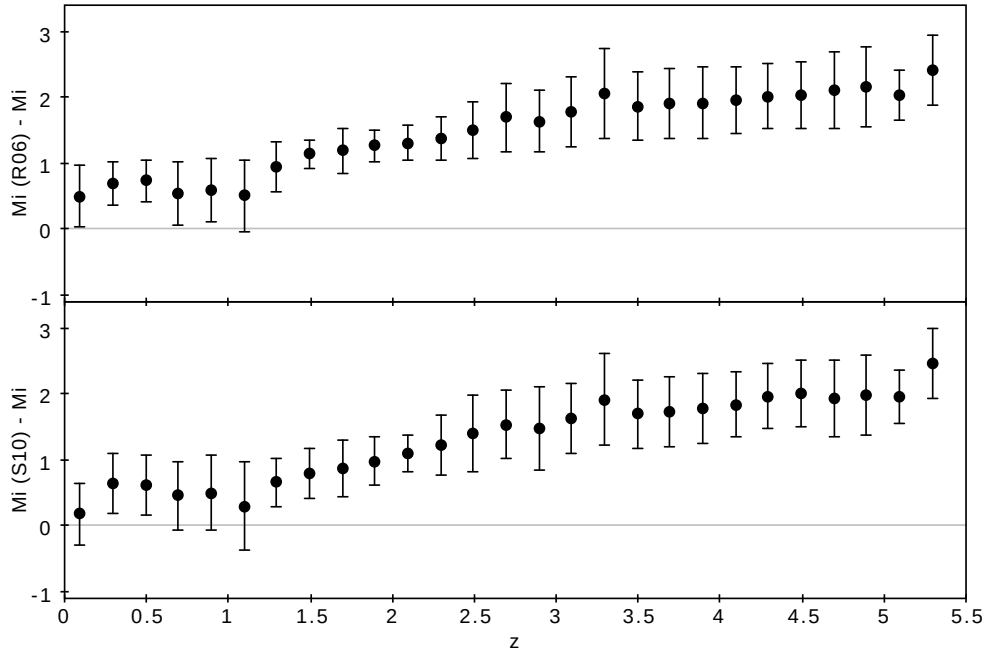

Figura 5.8: Nesta figura estão representadas as diferenças médias por intervalo de *redshift* de 0.2, em função do *redshift*. Em cima – M_i segundo (Richards et al. 2006) menos M_i deste trabalho. Embaixo – M_i (Schneider et al. 2010) menos M_i deste trabalho. É visível um aumento da diferença com o *redshift* em ambos os casos. As barras de erro representam 1σ das diferenças em cada intervalo de *redshift*.

Em ambos os casos é visível que a diferença aumenta com o *redshift*. Isto deve-se ao fato de que uma lei de potência simples negligencia emissão do contínuo para comprimentos de onda maiores que H_β (ver Vanden Berk et al. 2001), e com o aumento da distância entre o intervalo de comprimentos de onda observados e os correspondentes no referencial em repouso a quantidade de fluxo negligenciada aumenta.

Testamos os modelos de SED escolhidos, usados por nós para calcular as magnitudes absolutas dos QSOs do SDSS-DR7, verificando quão bem eles reproduzem os espectros observados do SDSS. Para isso selecionamos aleatoriamente ~ 1000 objetos distribuídos por 5 intervalos de *redshift*, ver Tabela 5.1. Em termos de magnitudes a mediana das diferenças entre as magnitudes obtidas do modelo e as obtidas do espetro observado pelo SDSS são: 0.40 mag para a banda g, 0.11 mag para a banda r e 0.06 mag para a banda i (ver Tabela 5.1), que representa $\sim 2 - 0.3\%$ das magnitudes aparentes médias. No caso da banda i o valor é da mesma ordem que os erros das magnitudes aparentes do SDSS. Isto sugere que a biblioteca de espetros sintéticos Gaia é de fato uma boa aproximação das SEDs dos QSOs do SDSS–DR7. Vendo os valores em função do intervalo de *redshift*, notamos que em geral as diferenças são próximas de zero, e podemos ver que os

piores ajustes são obtidos nos *redshifts* mais baixos, e vão sendo melhores à medida que o *redshift* aumenta. Sobre este aspecto, nos gostaríamos de chamar a atenção para o fato destas comparações serem feitas em termos de magnitude aparente (densidade de fluxo observado), que são mais brilhantes para *redshifts* mais baixos. Se normalizarmos as medianas das diferenças, em relação à mediana das magnitudes aparentes, em cada intervalo de *redshift*, a degradação dos ajustes em cada intervalo de *redshift* será atenuada. Na Fig.5.9 mostramos as medianas das diferenças entre os modelos e os espectros observados ($f_\nu Gaia - f_\nu SDSS$) normalizadas pela mediana dos espectros observados do SDSS, para cada um dos 5 intervalos de *redshift*. Levamos também em conta o peso estatístico de cada intervalo de *redshift*. Podemos ver que a degradação dos ajustes com o aumento de *redshift* era realmente provocada pelo facto da comparação ser feita em termos de magnitude aparente (fluxo observado). Ou seja, os ajustes são na realidade bons para todos os intervalos de *redshift*.

		g	r	i
total	$\Delta_{mediana}$	0.40	0.11	0.06
$0.20 \leq z \leq 0.25$	$\Delta_{mediana}$	0.50	0.31	0.21
$0.45 \leq z \leq 0.50$	$\Delta_{mediana}$	0.33	0.29	0.10
$0.70 \leq z \leq 0.75$	$\Delta_{mediana}$	—	0.06	0.01
$0.95 \leq z \leq 1.00$	$\Delta_{mediana}$	—	0.06	0.01
$1.20 \leq z \leq 1.25$	$\Delta_{mediana}$	—	0.09	0.06

Tabela 5.1: Medianas das diferenças entre as magnitudes aparentes obtidas dos modelos e as obtidas dos espectros observados do SDSS.

Como vimos no decorrer deste capítulo para z> 1.27 estamos a usar um espectro único (SWIRE+Gaia). Fizemos um exercício de utilizar esta *template* também nos objetos a z< 1.27. Verificamos ainda quão bem conseguimos recuperar as magnitudes aparentes observadas pelo SDSS, com esta *template* única. Os resultados são bons, mas no entanto, com a biblioteca Gaia os valores são em média $\sim$ 0.03 mag mais próximos das magnitudes aparentes do SDSS, do que com esta abordagem de espectro único. Assim, concluímos que a abordagem que utiliza uma única *template* é suficiente para várias aplicações, mas que a utilização da biblioteca de espectros sintéticos Gaia, permite obter melhores ajustes. Além disso, a utilização da biblioteca permite enriquecer as análises, como a que produzimos neste trabalho, com elementos adicionais como os diferentes índices espectrais α e diferentes intensidades de linhas de emissão W.

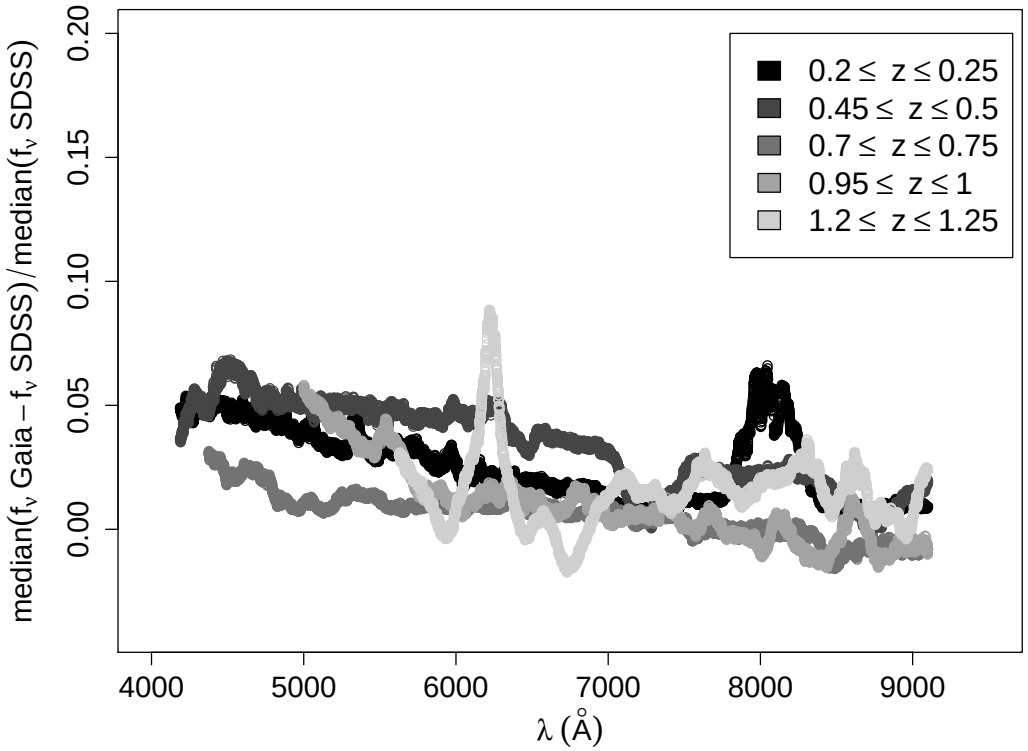

Figura 5.9: Medianas – em termos de densidade de fluxo (f_ν) em função do comprimento de onda (λ) – das diferenças entre modelos e os espectros observados do SDSS, normalizadas pela mediana dos espectros observados, para $\sim$ 1000 objetos aleatoriamente distribuídos em 5 intervalos de *redshift*. Os resultados também levam em conta o peso estatístico de cada intervalo de *redshift*.

5.7 Relações entre índices morfológicos e magnitudes absolutas

Até agora discutimos a possibilidade de utilizarmos os índices morfológicos das PSFs de QSOs, para obter informação sobre as galáxias hospedeiras. Exploramos a classificação morfológica de galáxias hospedeiras para um conjunto de objetos classificados como extensos pelo SDSS. No decorrer deste capítulo apresentamos uma nova aproximação para as magnitudes absolutas de QSOs. Agora nesta seção, vamos explorar como se relacionam as magnitudes absolutas determinadas neste capítulo e as morfologias das PSFs discutidas nos capítulos 2 a 4.

Para cada filtro do *ugriz* SDSS dividimos os 57893 QSOs (com índices determinados em todas as bandas; ver Capítulo 2) em dois grupos. Os que têm PSFs anômalas, quando algum dos 3 índices morfológicos (SHARP, SROUND ou GROUND) é ≥ 3, e os restantes que designamos aqui por "pontuais".

Testamos se havia alguma diferença entre a magnitude média observada para as fontes "pontuais" e a observada para as fontes com PSFs anômalas. Mas como os diferentes filtros acessam diferentes regiões do espetro emitido consoante o *redshift* da fonte, fazemos a comparação por intervalos de 1 Gyr em *lookback time*.

O *lookback time* até um dado objeto, corresponde à diferença entre a idade atual do Universo, no instante da observação, e a idade do Universo no tempo em que os fotons foram emitidos pelo objeto. Neste trabalho calculamos o *lookback time*, a partir do *redshift*, utilizando uma função do *software* TOPCAT, que usa as equações de Hogg (1999).

Na Fig. 5.10 podemos ver os valores médios das magnitudes absolutas (calculadas de acordo com a aproximação apresentada no Capítulo 5) em função do *lookback time*, os resultados são apresentados em 5 gráficos correspondentes aos 5 filtros. É visível uma ligeira tendência, para os objetos com PSFs perturbadas nos filtros u e z serem menos brilhantes que os objetos "pontuais", isso poderia sugerir que é mais fácil de ver as componentes extensas que afetariam as PSFs quando o AGN não é tão brilhante. No entanto os filtros r e i não permitem fazer nenhuma distinção e o filtro g revela um ligeiro comportamento no sentido contrário ao do filtro u. Na Tabela 5.2 apresentamos os números relativos à Fig. 5.10, magnitudes médias e os desvios padrão associados são mostrados em função *loockback time*, também são presentadas as diferenças entre as magnitudes relativas a ob-

jetos pontuais e as correspondentes a objetos com PSFs "anômalas". Podemos ver que as diferenças são normalmente inferiores aos valores dos desvios padrão das magnitudes. Face a diferenças tão pequenas ou ausência delas, podemos concluir que os objetos pontuais e os que apresentam PSF "anômala" não são diferentes em termos de magnitude absoluta.

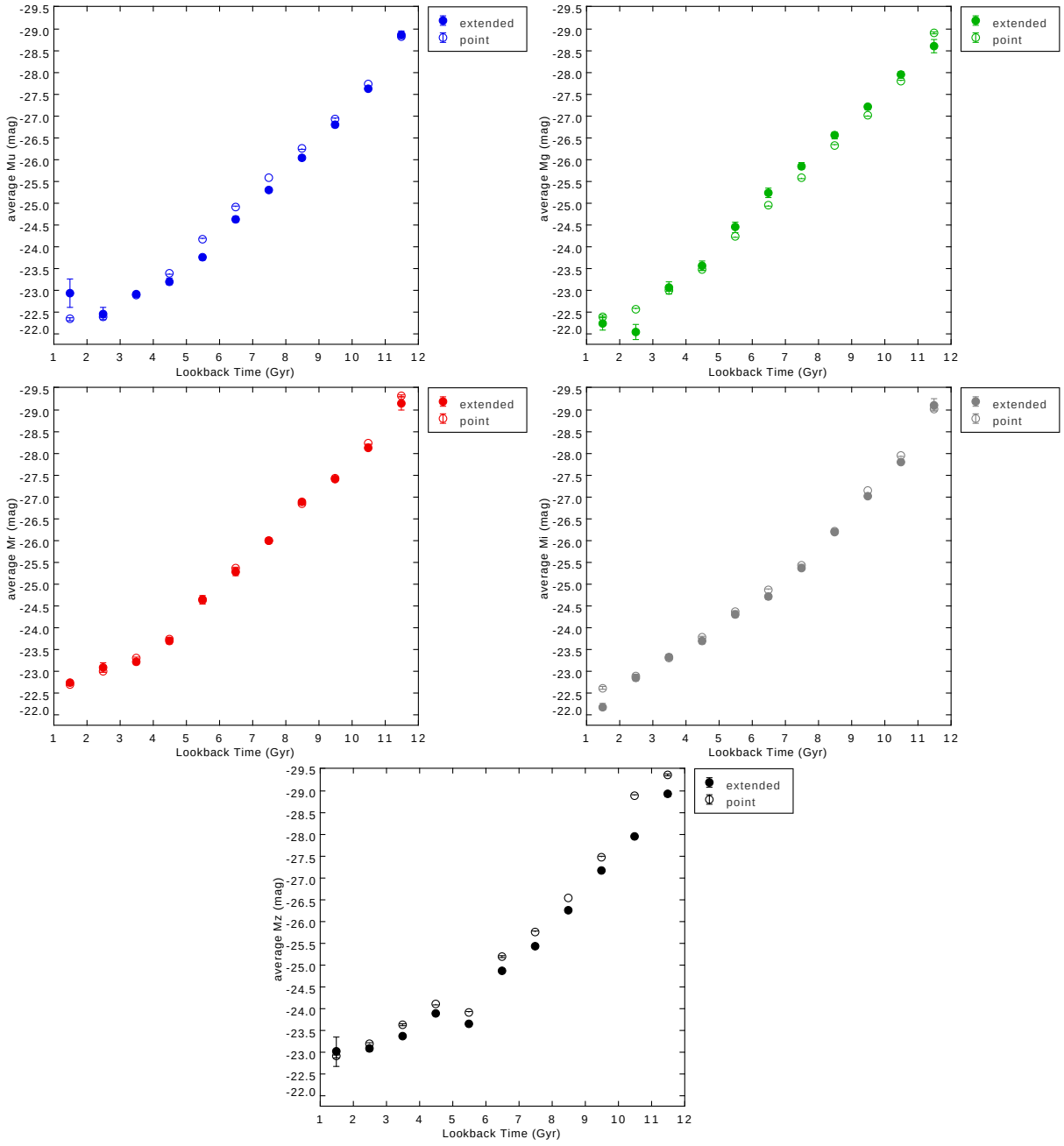

Figura 5.10: Distribuição da fração de QSOs com pelo menos um índice morfológico ≥ 3 para os filtros *ugriz* em função do *redshift* (em intervalos de 0.5).

	loockback time (*Gyr*)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5
u	$\langle M \rangle_{pt}$	-22.32	-22.37	-22.88	-23.37	-24.15	-24.89	-25.56	-26.23	-26.92	-27.71	-28.79
	σ_{pt}	0.55	0.60	0.64	0.70	0.67	0.69	0.70	0.63	0.68	0.72	0.75
	$\langle M \rangle_{ext.}$	-22.90	-22.44	-22.90	-23.18	-23.73	-24.61	-25.28	-26.02	-26.77	-27.59	-28.83
	$\sigma_{ext.}$	0.46	0.58	0.05	0.74	0.56	0.68	0.60	0.62	1.17	0.71	0.80
	dif.	0.59	0.07	0.02	0.19	0.43	0.28	0.28	0.20	0.15	0.12	0.04
g	$\langle M \rangle_{pt}$	-22.38	-22.55	-22.98	-23.44	-24.21	-24.92	-25.55	-26.31	-26.99	-27.78	-28.87
	σ_{pt}	0.53	0.57	0.59	0.65	0.65	0.66	0.71	0.65	0.70	0.72	0.75
	$\langle M \rangle_{ext.}$	-22.22	-22.02	-23.04	-23.54	-24.42	-25.21	-25.83	-26.54	-27.19	-27.92	-28.57
	$\sigma_{ext.}$	0.36	0.75	0.73	0.75	0.81	0.75	0.76	0.80	0.73	0.82	0.57
	dif.	0.16	0.53	0.06	0.09	0.22	0.29	0.27	0.23	0.20	0.14	0.30
r	$\langle M \rangle_{pt}$	-22.68	-22.97	-23.28	-23.71	-24.59	-25.35	-25.96	-26.81	-27.40	-28.20	-29.29
	σ_{pt}	0.53	0.61	0.59	0.65	0.69	0.68	0.79	0.77	0.70	0.72	0.75
	$\langle M \rangle_{ext.}$	-22.72	-23.06	-23.20	-23.68	-24.62	-25.26	-25.97	-26.85	-27.39	-28.11	-29.12
	$\sigma_{ext.}$	0.0	0.57	0.51	0.66	0.78	0.78	0.82	0.80	0.70	0.77	0.90
	dif.	0.04	0.09	0.09	0.04	0.02	0.09	0.01	0.04	0.01	0.09	0.17
i	$\langle M \rangle_{pt}$	-22.59	-22.86	-23.28	-23.76	-24.35	-24.85	-25.41	-26.19	-27.12	-27.92	-29.00
	σ_{pt}	0.51	0.55	0.55	0.64	0.62	0.82	0.83	0.78	0.71	0.72	0.74
	$\langle M \rangle_{ext.}$	-22.16	-22.83	-23.30	-23.67	-24.28	-24.69	-25.34	-26.16	-26.99	-27.78	-29.09
	$\sigma_{ext.}$	0.13	0.51	0.63	0.60	0.60	0.74	0.74	0.83	0.65	0.77	0.93
	dif.	0.44	0.03	0.02	0.09	0.07	0.16	0.07	0.03	0.13	0.14	0.09
z	$\langle M \rangle_{pt}$	-22.89	-23.18	-23.61	-24.08	-23.90	-25.17	-25.74	-26.52	-27.46	-28.87	-29.34
	σ_{pt}	0.51	0.55	0.56	0.65	0.66	0.82	0.84	0.79	0.71	0.69	0.76
	$\langle M \rangle_{ext.}$	-22.99	-23.05	-23.35	-23.87	-23.62	-24.85	-25.40	-26.24	-27.14	-27.92	-28.90
	$\sigma_{ext.}$	0.48	0.41	0.34	0.51	0.48	0.74	0.74	0.68	0.55	0.83	0.57
	dif.	0.10	0.13	0.26	0.21	0.27	0.32	0.34	0.28	0.32	0.95	0.44
N		190	1032	2183	3097	3359	4241	6626	9628	14931	11463	1143

Tabela 5.2: Valores – em função do *loockback time* – das magnitudes médias das fontes pontuais ($\langle M \rangle^{pt}$) e das fontes com PSFs anômalas ($\langle M \rangle^{ext.}$) e respetivos desvios padrão (σ). O dif. representa o módulo da diferença entre $\langle M \rangle^{pt}$ e $\langle M \rangle^{ext.}$. N corresponde ao número de objetos por intervalo de *loockback time*.

Fomos averiguar também se haveria alguma diferença entre os objetos pontuais e os que apresentam algum índice morfológico ≥ 3 em termos do índice espectral α e/ou da intensidade das linhas W escolhidos pelo algoritmo de cálculo das magnitudes absolutas. Verificamos que em todos os filtros do SDSS, o valor médio de α é igual para os dois grupos de QSOs, o mesmo acontece para o valor de W. Isto sugere que a capacidade dos índices morfológicos detectarem ou não componentes extensas associadas aos QSOs é independente do índice espectral associado ao contínuo e é também independente da intensidade geral das linhas de emissão.

5.8 Conclusão

Foi apresentada neste capítulo uma nova abordagem para calcular magnitudes absolutas de QSOs que leva em consideração a absorção da floresta de Ly_α e ambas as extinções, a Galáctica e correspondente à galáxia hospedeira. Depois de aplicarmos a correção para a floresta de Ly_α, mostramos que a hipótese da lei de extinção SMC "barra" ser usada para *redshifts* maiores a 2.2 é razoável. Do ponto de vista da SED, a nossa abordagem permite considerar diferentes índices espectrais e diferentes intensidades para as linhas de emissão. Isto traduz-se numa abordagem mais completa, comparada com as que são normalmente usadas na literatura. Nossas magnitudes absolutas tendem a ser mais brilhantes (até 2 mag) do que as disponíveis nos catálogos do SDSS. Realçamos também alguns aspectos que resultaram deste trabalho:

- notamos que o SDSS-DR7 seleciona alguns objetos com contínuo mais fraco quando linhas de emissão fortes são observadas na banda i.
- os valores mais altos de W acima de 10^5 e valores extremos do índice espectral $|\alpha| > 2.5$ disponíveis na biblioteca de espectros sintéticos Gaia não ajustam bem os QSOs do catálogo do SDSS-DR7.
- é necessário ter cuidados extra na escolha de um modelo para a SED dos QSOs quando estão em jogo linhas de emissão fortes.
- a lei de extinção da SMC "barra" parece ser uma boa aproximação para corrigir a os efeitos da extinção por poeira que possa existir na galaxia hospedeira de um dado QSO.

Em termos de magnitude absoluta, não foi encontrada qualquer diferença, que distinga os objetos pontuais dos objetos que apresentam PSFs "anômalas" (como percebidos pelos índices morfológicos). Isto sugere que as magnitudes absolutas são dominadas pela emissão do AGN e que a contribuição das hospedeiras são muito pequenas. Também não encontramos nenhuma diferença que distinga os dois grupos de objetos, em termos de índices espectral α nem em termos da intensidade das linhas de emissão W.

Capítulo 6

CONCLUSÕES GERAIS

Vamos agora resumir as principais conclusões do trabalho realizado durante o presente doutorado.

Os índices morfológicos SHARP, SROUND e GROUND medem desvios da PSF do QSO relativamente à PSF estelar média, em termos de curtose, circularidade e gaussianidade respectivamente. Pela primeira vez este tipo de índices morfológicos é utilizado para explorar propriedades de galáxias hospedeiras de QSOs.

Foram obtidos índices morfológicos para os QSOs do SDSS-DR7 usando imagens do SDSS e paralelamente também obtivemos índices para os QSOs do LQAC-3 usando imagens do DSS. Da análise da morfologia das PSFs destes objetos, mostramos que apesar da maioria dos QSOs apresentar de fato comportamento pontual, um número ainda apreciável apresenta desvios importantes (pelo menos um índice ≥ 3) relativamente à PSF estelar média. Os nossos resultados mostram também que os índices são independentes entre si, que não dependem da magnitude aparente dos objetos e que não dependem também da instrumentação utilizada para captura das imagens. Mudando as propriedades da amostra analisada, no caso o *redshift* verificamos a existência de mudanças no comportamento dos índices morfológicos. Estes passam a ser mais sensíveis a perturbações em comprimentos de onda menores, em especial em *redshift* $\sim 2-3$. Da análise destes objetos com PSFs "anômalas" mostramos:

- pela primeira vez, de forma observacional e com uma amostra significativa de QSOs do SDSS-DR7, que as PSFs dos QSOs podem sofrer contaminação por parte de estrelas da Galáxia que se encontram próximas à linha de visada do QSO. Este resultado é muito relevante, no âmbito de medições astrométricas, como por exemplo

as que estão sendo efetuadas pela missão Gaia da ESA.

- que os índices morfológicos são capazes de perceber perturbações nas PSFs associadas a causas extragaláticas até pelo menos z$\sim$ 3.

- que existem objetos com PSFs "anômalas", cujas perturbações serão causadas por emissão correspondente no referencial em repouso ao óptico e ultravioleta próximo, numa gama de comprimentos de onda entre as linhas de emissão [OII]λ3737 e [OIII]λ5007.

- que fontes a z$>$ 1.5 revelam PSFs perturbadas por emissão, que no referencial em repouso, correspondente ao ultravioleta, e que inclui comprimentos de onda menores que 1216 Å correspondentes à linha de emissão Lyα.

Estes resultados sugerem que as galáxias hospedeiras de QSOs especialmente a z$>$ 0.5 podem ser objetos de grande luminosidade contendo populações estelares jovens, e/ou terem a elas associadas regiões extensas de gás ionizado emitindo no ultravioleta (eg. Lyα *blobs*). As emissões extensas no ultravioleta associadas ao sistema QSO+hospedeiras, tornam-se mais importantes com o aumento do *redshift*.

Considerando uma sub-amostra de QSOs classificados como extensos pelo SDSS, encontramos que estes QSOs são predominantemente de baixo *redshift* (z$<$ 0.5) e de baixas luminosidades. Da análise de imagens do SDSS, feita com o ELLIPSE do IRAF, obtivemos elipticidades e índices de Sérsic. Juntando ainda informação obtida por inspeção visual das imagens, os nossos resultados mostram que estes QSOs:

- se encontram em hospedeiras de morfologias variadas entre: elípticas, espirais/disco e ainda as que apresentam sinais de interações/colisões com outras galáxias.

- surgem com maior frequência em galáxias disco/espirais do que galáxias elípticas

- estão, em grande parte das vezes, em hospedeiras que mostram morfologias distorcidas ou irregulares, que evidenciam interações ou colisões entre galáxias.

A classificação pontual/extenso do SDSS e os nossos índices morfológicos concordam que a grande maioria dos QSOs têm realmente aparência pontual, ou seja os diferentes métodos são coincidentes na quase totalidade dos casos. Também concordam que apenas uma minoria de QSOs revela (de alguma forma) a presença da hospedeira. Para esta minoria de

QSOs, a classificação do SDSS juntamente com as análises de morfologia das hospedeiras que nós aplicamos neste trabalho, são complementares das informações obtidas com os índices morfológicos. Enquanto que as primeiras são mais eficazes para nos darem informações mais detalhadas de hospedeiras, que surgem nas imagens totalmente resolvidas, os índices morfológicos servem precisamente para obter informação de objetos em que a hospedeira é aparentemente imperceptível.

Apresentamos nesta tese uma nova aproximação para o cálculo de magnitudes absolutas de QSOs, que se destaca das demais existentes na literatura, porque usamos a biblioteca de espectros sintéticos de Gaia, para modelar a SED dos QSOs. Esta aproximação (em que se usa uma grade de modelos) permite-nos maior flexibilidade porque inclui *templates* com diferentes índices espectrais e com diferentes intensidades de linhas de emissão. Assim, com a biblioteca de espectros obtemos uma melhoria no ajuste das SEDs observadas, em relação a usar apenas uma única *template*, que é em média da ordem do erro das magnitudes observadas do SDSS ($\sim$ 0.03mag). Nossas magnitudes absolutas incluem a emissão do contínuo, mais a proveniente das linhas de emissão, também incluem correções para extinção devido à poeira da Galáxia, correções para o avermelhamento provocado por poeira existente nas hospedeiras dos QSOs, e ainda correções para a absorção da chamada floresta de Lyα. As magnitudes que calculamos para os QSOs do SDSS-DR7, são mais brilhantes que as obtidas por Schneider et al. (2010) e as obtidas seguindo Richards et al. (2006). Em média a diferença aumenta com o *redshift* e nossas magnitudes absolutas chegam a ser até duas magnitudes mais brilhantes. Ao relacionarmos as magnitudes absolutas obtidas com os índices morfológicos, não encontramos qualquer diferença entre os objetos pontuais, e os que apresentam PSFs "anômalas" (pelo menos um dos índices morfológicos ≥ 3). Isto sugere que as magnitudes absolutas são dominadas pela emissão do AGN e que a contribuição das hospedeiras são muito pequenas. Também não encontramos relação nenhuma dos índices morfológicos com o índice espectral (α) e/ou com a intensidade das linhas de emissão W.

Podemos afirmar que os objetivos a que nos propusemos no início deste doutorado foram plenamente alcançados. Temos agora informação sobre morfologia das PSFs de amostras significativas de QSOs, cujos resultados já foram em parte disponibilizados à comunidade (LQAC-3), e que poderão servir de comparação para resultados futuros obtidos por levantamentos como o Gaia. Os índices morfológicos (SHARP, SROUND e

GROUND) previamente utilizados para aferir sobre a qualidade astrométrica das PSFs dos QSOs, foram aqui usados pela primeira vez para discutir propriedades das galáxias hospedeiras. Nossas análises mostraram que eles podem de fato contribuir com informação relevante para esta área da astrofísica extragaláctica. Durante este trabalho reunimos uma enorme quantidade de informação, e os conhecimentos que dela podem ser obtidos, não se esgotam nas análises que apresentamos nesta tese. O nosso maior legado foi talvez abrir uma nova frente, para obtenção de informação sobre galáxias hospedeiras. Na era dos grandes levantamentos astronômicos, ela permite a utilização de observações destes para, através da estatística, obter informações úteis para uma área da astrofísica extragaláctica, que até agora dependia quase em exclusividade de observações difíceis de obter e referentes a apenas alguns objetos específicos. No entanto os índices morfológicos, podem também ser uma mais valia, na seleção de objetos mais interessantes, para futuros estudos detalhados.

Referências Bibliográficas

[1] Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., Allende Prieto, C., An, D., Anderson, K. S. J., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., and et al. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophysical Journal Supplement Series 182* (June 2009), 543–558.

[2] Abraham, R. G. Quantifying Morphological Evolution from Low to High Redshifts. 323–338.

[3] Ahn, C. P., Alexandroff, R., Allende Prieto, C., Anders, F., Anderson, S. F., Anderton, T., Andrews, B. H., Aubourg, É., Bailey, S., Bastien, F. A., and et al. The Tenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment. *Astrophysical Journal Supplement Series 211* (Apr. 2014), 17.

[4] Allen, R. J., Kacprzak, G. G., Glazebrook, K., Labbé, I., Tran, K.-V. H., Spitler, L. R., Cowley, M., Nanayakkara, T., Papovich, C., Quadri, R., Straatman, C. M. S., Tilvi, V., and van Dokkum, P. The Size Evolution of Star-forming Galaxies since z$\sim$ 7 Using ZFOURGE. *Astrophysical Journal Letters 834* (Jan. 2017), L11.

[5] Andrei, A. H., and et al. QSO catalogue for Gaia. In *first DPAC consortium meeting was held in Leiden, 16-20 November 2015.* (Nov. 2015).

[6] Andrei, A. H., Gontier, A.-M., Barache, C., da Silva Neto, D. N., and et al. GAIA initial quasar catalogue - updates: morphology and variability. In

Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2010 (Oct. 2011), N. Capitaine, Ed., pp. 125–126.

[7] Assafin, M., Vieira-Martins, R., Andrei, A. H., Camargo, J. I. B., and da Silva Neto, D. N. Rio survey of optical astrometric positions for 300 ICRF2 sources and the current optical/radio frame link status before Gaia. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 430* (Apr. 2013), 2797–2814.

[8] Bahcall, J. N., Kirhakos, S., and Schneider, D. P. Hubble Space Telescope Images of Nearby Luminous Quasars. II. Results for Eight Quasars and Tests of the Detection Sensitivity. *Astrophysical Journal 450* (Sept. 1995), 486.

[9] Bastian, U. Reference Systems, Conventions and Notations for Gaia. In *GAIA-CA-SP-ARI-BAS-003-06* (June 2007), p. 10.

[10] Becker, R. H., White, R. L., and Helfand, D. J. The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters. *Astrophysical Journal 450* (Sept. 1995), 559.

[11] Bennert, N., Canalizo, G., Jungwiert, B., Stockton, A., Schweizer, F., Peng, C. Y., and Lacy, M. Evidence for Merger Remnants in Early-Type Host Galaxies of Low-Redshift QSOs. *Astrophysical Journal 677* (Apr. 2008), 846–857.

[12] Blandford, R. D. Physical processes in active galactic nuclei. In *Active Galactic Nuclei* (1990), R. D. Blandford, H. Netzer, L. Woltjer, T. J.-L. Courvoisier, and M. Mayor, Eds., pp. 161–275.

[13] Blanton, M. R., Hogg, D. W., Bahcall, N. A., Baldry, I. K., Brinkmann, J., Csabai, I., Eisenstein, D., Fukugita, M., Gunn, J. E., Ivezić, Ž., Lamb, D. Q., Lupton, R. H., Loveday, J., Munn, J. A., Nichol, R. C., Okamura, S., Schlegel, D. J., Shimasaku, K., Strauss, M. A., Vogeley, M. S., and Weinberg, D. H. The Broadband Optical Properties of Galaxies with Redshifts $0.02<z<0.22$. *Astrophysical Journal 594* (Sept. 2003), 186–207.

[14] Bower, R. G., Benson, A. J., Malbon, R., Helly, J. C., Frenk, C. S., Baugh, C. M., Cole, S., and Lacey, C. G. Breaking the hierarchy of galaxy

formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 370* (Aug. 2006), 645–655.

[15] Boyce, P. J., Disney, M. J., Blades, J. C., Boksenberg, A., Crane, P., Deharveng, J. M., Macchetto, F. D., Mackay, C. D., and Sparks, W. B. HST Planetary Camera images of quasar host galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 298* (July 1998), 121–130.

[16] Browne, I. W. A., Wilkinson, P. N., Patnaik, A. R., and Wrobel, J. M. Interferometer phase calibration sources. II - The region delta$_{B1950}$ from 0 deg to 20 deg. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 293* (Jan. 1998), 257.

[17] Busch, G., Zuther, J., Valencia-S., M., Moser, L., Fischer, S., Eckart, A., Scharwächter, J., Gadotti, D. A., and Wisotzki, L. A low-luminosity type-1 QSO sample. I. Overluminous host spheroidals or undermassive black holes. *Astronomy and Astrophysics 561* (Jan. 2014), A140.

[18] Calvi, V., Stiavelli, M., Bradley, L., Pizzella, A., and Kim, S. The Effect of Surface Brightness Dimming in the Selection of High-z Galaxies. *Astrophysical Journal 796* (Dec. 2014), 102.

[19] Canalizo, G., and Stockton, A. Intermediate-age Stellar Populations in Classical Quasi-stellar Object Host Galaxies. *Astrophysical Journal 772* (Aug. 2013), 132.

[20] Canalizo, G., Stockton, A., Brotherton, M. S., and Lacy, M. Star formation in QSO host galaxies. *New Astronomy Reviews 50* (Nov. 2006), 650–656.

[21] Cardelli, J. A., Clayton, G. C., and Mathis, J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *Astrophysical Journal 345* (Oct. 1989), 245–256.

[22] Chambers, K. C., Miley, G. K., and van Breugel, W. Alignment of radio and optical orientations in high-redshift radio galaxies. *Nature 329* (Oct. 1987), 604–606.

[23] Claeskens, J.-F., Smette, A., Vandenbulcke, L., and Surdej, J. Identification and redshift determination of quasi-stellar objects with medium-band photometry: application to Gaia. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 367* (Apr. 2006), 879–904.

[24] Claussen, M. *VLA Calibrator manual.* 2006.

[25] Croom, S. M., Smith, R. J., Boyle, B. J., Shanks, T., Miller, L., Outram, P. J., and Loaring, N. S. The 2dF QSO Redshift Survey - XII. The spectroscopic catalogue and luminosity function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 349* (Apr. 2004), 1397–1418.

[26] Croton, D. J., Springel, V., White, S. D. M., De Lucia, G., Frenk, C. S., Gao, L., Jenkins, A., Kauffmann, G., Navarro, J. F., and Yoshida, N. The many lives of active galactic nuclei: cooling flows, black holes and the luminosities and colours of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 365* (Jan. 2006), 11–28.

[27] Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., Beichman, C. A., Carpenter, J. M., Chester, T., Cambresy, L., Evans, T., Fowler, J., Gizis, J., Howard, E., Huchra, J., Jarrett, T., Kopan, E. L., Kirkpatrick, J. D., Light, R. M., Marsh, K. A., McCallon, H., Schneider, S., Stiening, R., Sykes, M., Weinberg, M., Wheaton, W. A., Wheelock, S., and Zacarias, N. *2MASS All Sky Catalog of point sources.* June 2003.

[28] da Ângela, J., Shanks, T., Croom, S. M., Weilbacher, P., Brunner, R. J., Couch, W. J., Miller, L., Myers, A. D., Nichol, R. C., Pimbblet, K. A., de Propris, R., Richards, G. T., Ross, N. P., Schneider, D. P., and Wake, D. The 2dF-SDSS LRG and QSO survey: QSO clustering and the L-z degeneracy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 383* (Jan. 2008), 565–580.

[29] Dawson, K. S., Schlegel, D. J., Ahn, C. P., Anderson, S. F., Aubourg, É., Bailey, S., Barkhouser, R. H., Bautista, J. E., Beifiori, A., Berlind, A. A., Bhardwaj, V., Bizyaev, D., Blake, C. H., Blanton, M. R., Blomqvist, M., Bolton, A. S., Borde, A., Bovy, J., Brandt, W. N.,

Brewington, H., Brinkmann, J., Brown, P. J., Brownstein, J. R., Bundy, K., Busca, N. G., Carithers, W., Carnero, A. R., Carr, M. A., Chen, Y., Comparat, J., Connolly, N., Cope, F., Croft, R. A. C., Cuesta, A. J., da Costa, L. N., Davenport, J. R. A., Delubac, T., de Putter, R., Dhital, S., Ealet, A., Ebelke, G. L., Eisenstein, D. J., Escoffier, S., Fan, X., Filiz Ak, N., Finley, H., Font-Ribera, A., Génova-Santos, R., Gunn, J. E., Guo, H., Haggard, D., Hall, P. B., Hamilton, J.-C., Harris, B., Harris, D. W., Ho, S., Hogg, D. W., Holder, D., Honscheid, K., Huehnerhoff, J., Jordan, B., Jordan, W. P., Kauffmann, G., Kazin, E. A., Kirkby, D., Klaene, M. A., Kneib, J.-P., Le Goff, J.-M., Lee, K.-G., Long, D. C., Loomis, C. P., Lundgren, B., Lupton, R. H., Maia, M. A. G., Makler, M., Malanushenko, E., Malanushenko, V., Mandelbaum, R., Manera, M., Maraston, C., Margala, D., Masters, K. L., McBride, C. K., McDonald, P., McGreer, I. D., McMahon, R. G., Mena, O., Miralda-Escudé, J., Montero-Dorta, A. D., Montesano, F., Muna, D., Myers, A. D., Naugle, T., Nichol, R. C., Noterdaeme, P., Nuza, S. E., Olmstead, M. D., Oravetz, A., Oravetz, D. J., Owen, R., Padmanabhan, N., Palanque-Delabrouille, N., Pan, K., Parejko, J. K., Pâris, I., Percival, W. J., Pérez-Fournon, I., Pérez-Ràfols, I., Petitjean, P., Pfaffenberger, R., Pforr, J., Pieri, M. M., Prada, F., Price-Whelan, A. M., Raddick, M. J., Rebolo, R., Rich, J., Richards, G. T., Rockosi, C. M., Roe, N. A., Ross, A. J., Ross, N. P., Rossi, G., Rubiño-Martin, J. A., Samushia, L., Sánchez, A. G., Sayres, C., Schmidt, S. J., Schneider, D. P., Scóccola, C. G., Seo, H.-J., Shelden, A., Sheldon, E., Shen, Y., Shu, Y., Slosar, A., Smee, S. A., Snedden, S. A., Stauffer, F., Steele, O., Strauss, M. A., Streblyanska, A., Suzuki, N., Swanson, M. E. C., Tal, T., Tanaka, M., Thomas, D., Tinker, J. L., Tojeiro, R., Tremonti, C. A., Vargas Magaña, M., Verde, L., Viel, M., Wake, D. A., Watson, M., Weaver, B. A., Weinberg, D. H., Weiner, B. J., West, A. A., White, M., Wood-Vasey, W. M., Yeche, C., Zehavi, I., Zhao, G.-B., and Zheng, Z. The Baryon Oscillation Spectroscopic Survey of SDSS-III. *Astronomical Journal 145* (Jan. 2013), 10.

[30] de Vaucouleurs, G. Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques. *Annales d'Astrophysique 11* (Jan. 1948), 247.

[31] de Vaucouleurs, G. Classification and Morphology of External Galaxies. *Handbuch der Physik 53* (1959), 275.

[32] Eisenstein, D. J., Weinberg, D. H., Agol, E., Aihara, H., Allende Prieto, C., Anderson, S. F., Arns, J. A., Aubourg, É., Bailey, S., Balbinot, E., and et al. SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems. *Astronomical Journal 142* (Sept. 2011), 72.

[33] Falomo, R. Evolution of Quasar Host Galaxies. *Astrophysics and Space Science 294* (Nov. 2004), 57–61.

[34] Falomo, R., Kotilainen, J. K., Pagani, C., Scarpa, R., and Treves, A. The Cosmic Evolution of Quasar Host Galaxies. *Astrophysical Journal 604* (Apr. 2004), 495–507.

[35] Ferrarese, L., and Merritt, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. *Astrophysical Journal Letters 539* (Aug. 2000), L9–L12.

[36] Fey, A. L., Gordon, D., Jacobs, C. S., Ma, C., Gaume, R. A., Arias, E. F., Bianco, G., Boboltz, D. A., Böckmann, S., Bolotin, S., Charlot, P., Collioud, A., Engelhardt, G., Gipson, J., Gontier, A.-M., Heinkelmann, R., Kurdubov, S., Lambert, S., Lytvyn, S., MacMillan, D. S., Malkin, Z., Nothnagel, A., Ojha, R., Skurikhina, E., Sokolova, J., Souchay, J., Sovers, O. J., Tesmer, V., Titov, O., Wang, G., and Zharov, V. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry. *Astronomical Journal 150* (Aug. 2015), 58.

[37] Finet, F., Elyiv, A., and Surdej, J. Detection of bright multiply imaged quasars with Gaia . 944.

[38] Fomalont, E. B., Petrov, L., MacMillan, D. S., Gordon, D., and Ma, C. The Second VLBA Calibrator Survey: VCS2. *Astronomical Journal 126* (Nov. 2003), 2562–2566.

[39] Francis, P. J., Hewett, P. C., Foltz, C. B., Chaffee, F. H., Weymann, R. J., and Morris, S. L. A high signal-to-noise ratio composite quasar spectrum. *Astrophysical Journal 373* (June 1991), 465–470.

[40] Freeman, K. C. On the Disks of Spiral and S0 Galaxies. *Astrophysical Journal 160* (June 1970), 811.

[41] Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., and Schneider, D. P. The Sloan Digital Sky Survey Photometric System. *Astronomical Journal 111* (Apr. 1996), 1748.

[42] Gallerani, S., Maiolino, R., Juarez, Y., Nagao, T., Marconi, A., Bianchi, S., Schneider, R., Mannucci, F., Oliva, T., Willott, C. J., Jiang, L., and Fan, X. The extinction law at high redshift and its implications. *Astronomy and Astrophysics 523* (Nov. 2010), A85.

[43] Gaskell, C. M., Goosmann, R. W., Antonucci, R. R. J., and Whysong, D. H. The Nuclear Reddening Curve for Active Galactic Nuclei and the Shape of the Infrared to X-Ray Spectral Energy Distribution. *Astrophysical Journal 616* (Nov. 2004), 147–156.

[44] Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Green, R., Grillmair, C., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J., Pinkney, J., Richstone, D., and Tremaine, S. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. *Astrophysical Journal Letters 539* (Aug. 2000), L13–L16.

[45] Gordon, K. D., Clayton, G. C., Misselt, K. A., Landolt, A. U., and Wolff, M. J. A Quantitative Comparison of the Small Magellanic Cloud, Large Magellanic Cloud, and Milky Way Ultraviolet to Near-Infrared Extinction Curves. *Astrophysical Journal 594* (Sept. 2003), 279–293.

[46] Gunn, J. E., Carr, M., Rockosi, C., Sekiguchi, M., Berry, K., Elms, B., de Haas, E., Ivezić, Ž., Knapp, G., Lupton, R., Pauls, G., Simcoe, R., Hirsch, R., Sanford, D., Wang, S., York, D., Harris, F., Annis, J., Bartozek, L., Boroski, W., Bakken, J., Haldeman, M., Kent, S., Holm, S., Holmgren, D., Petravick, D., Prosapio, A., Rechenmacher, R., Doi, M., Fukugita, M., Shimasaku, K., Okada, N., Hull, C., Siegmund, W., Mannery, E., Blouke, M., Heidtman, D., Schneider, D., Lucinio, R., and Brinkman, J. The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera. *Astronomical Journal 116* (Dec. 1998), 3040–3081.

[47] Gunn, J. E., Siegmund, W. A., Mannery, E. J., Owen, R. E., Hull, C. L., Leger, R. F., Carey, L. N., Knapp, G. R., York, D. G., Boroski, W. N., Kent, S. M., Lupton, R. H., Rockosi, C. M., Evans, M. L., Waddell, P., Anderson, J. E., Annis, J., Barentine, J. C., Bartoszek, L. M., Bastian, S., Bracker, S. B., Brewington, H. J., Briegel, C. I., Brinkmann, J., Brown, Y. J., Carr, M. A., Czarapata, P. C., Drennan, C. C., Dombeck, T., Federwitz, G. R., Gillespie, B. A., Gonzales, C., Hansen, S. U., Harvanek, M., Hayes, J., Jordan, W., Kinney, E., Klaene, M., Kleinman, S. J., Kron, R. G., Kresinski, J., Lee, G., Limmongkol, S., Lindenmeyer, C. W., Long, D. C., Loomis, C. L., McGehee, P. M., Mantsch, P. M., Neilsen, Jr., E. H., Neswold, R. M., Newman, P. R., Nitta, A., Peoples, Jr., J., Pier, J. R., Prieto, P. S., Prosapio, A., Rivetta, C., Schneider, D. P., Snedden, S., and Wang, S.-i. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey. *Astronomical Journal 131* (Apr. 2006), 2332–2359.

[48] Guyon, O., Sanders, D. B., and Stockton, A. Near-Infrared Adaptive Optics Imaging of QSO Host Galaxies. *Astrophysical Journal Supplement Series 166* (Sept. 2006), 89–127.

[49] Hamilton, T. S., Casertano, S., and Turnshek, D. A. The Luminosity Function of QSO Host Galaxies. *Astrophysical Journal 576* (Sept. 2002), 61–74.

[50] Heckman, T. M., and Best, P. N. The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics 52* (Aug. 2014), 589–660.

[51] Hewitt, A., and Burbidge, G. A revised and updated catalog of quasi-stellar objects. *Astrophysical Journal Supplement Series 87* (Aug. 1993), 451–947.

[52] Hogg, D. W. Distance measures in cosmology. *ArXiv Astrophysics e-prints* (May 1999).

[53] Hooper, E. J., Impey, C. D., and Foltz, C. B. Hubble Space Telescope Imaging of z $\geq$ 0.4 Quasar Host Galaxies Selected by Quasar Radio and Optical Properties. *Astrophysical Journal Letters 480* (May 1997), L95–L98.

[54] Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., Di Matteo, T., Robertson, B., and Springel, V. A Unified, Merger-driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids. *Astrophysical Journal Supplement Series 163* (Mar. 2006), 1–49.

[55] Hopkins, P. F., Strauss, M. A., Hall, P. B., Richards, G. T., Cooper, A. S., Schneider, D. P., Vanden Berk, D. E., Jester, S., Brinkmann, J., and Szokoly, G. P. Dust Reddening in Sloan Digital Sky Survey Quasars. *Astronomical Journal 128* (Sept. 2004), 1112–1123.

[56] Hubble, E. P. *Realm of the Nebulae.* 1936.

[57] Hutchings, J. B., Holtzman, J., Sparks, W. B., Morris, S. C., Hanisch, R. J., and Mo, J. HST imaging of quasi-stellar objects with WFPC2. *Astrophysical Journal Letters 429* (July 1994), L1–L4.

[58] Jahnke, K., Sánchez, S. F., Wisotzki, L., Barden, M., Beckwith, S. V. W., Bell, E. F., Borch, A., Caldwell, J. A. R., Häussler, B., Heymans, C., Jogee, S., McIntosh, D. H., Meisenheimer, K., Peng, C. Y., Rix, H.-W., Somerville, R. S., and Wolf, C. Ultraviolet Light from Young Stars in GEMS Quasar Host Galaxies at 1.8<z<2.75. *Astrophysical Journal 614* (Oct. 2004), 568–585.

[59] Jiang, L., Fan, X., Ivezić, Ž., Richards, G. T., Schneider, D. P., Strauss, M. A., and Kelly, B. C. The Radio-Loud Fraction of Quasars is a Strong Function of Redshift and Optical Luminosity. *Astrophysical Journal 656* (Feb. 2007), 680–690.

[60] Jordi, C., Gebran, M., Carrasco, J. M., de Bruijne, J., Voss, H., Fabricius, C., Knude, J., Vallenari, A., Kohley, R., and Mora, A. Gaia broad band photometry. *Astronomy and Astrophysics 523* (Nov. 2010), A48.

[61] Kashikawa, N., Misawa, T., Minowa, Y., Okoshi, K., Hattori, T., Toshikawa, J., Ishikawa, S., and Onoue, M. Extended Lyα Emission from a Damped Lyα Absorber at z = 3.115. *Astrophysical Journal 780* (Jan. 2014), 116.

[62] Kauffmann, G., and Haehnelt, M. A unified model for the evolution of galaxies and quasars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 311* (Jan. 2000), 576–588.

[63] Kellermann, K. I., Condon, J. J., Kimball, A. E., Perley, R. A., and Ivezić, Ž. Radio-loud and Radio-quiet QSOs. *Astrophysical Journal 831* (Nov. 2016), 168.

[64] Kellermann, K. I., Sramek, R., Schmidt, M., Shaffer, D. B., and Green, R. VLA observations of objects in the Palomar Bright Quasar Survey. *Astronomical Journal 98* (Oct. 1989), 1195–1207.

[65] Kellermann, K. I., Sramek, R. A., Schmidt, M., Green, R. F., and Shaffer, D. B. The radio structure of radio loud and radio quiet quasars in the Palomar Bright Quasar Survey. *Astronomical Journal 108* (Oct. 1994), 1163–1177.

[66] Kotilainen, J. K., Falomo, R., Decarli, R., Treves, A., Uslenghi, M., and Scarpa, R. The Properties of Quasar Hosts at the Peak of the Quasar Activity. *Astrophysical Journal 703* (Oct. 2009), 1663–1671.

[67] Kotilainen, J. K., Falomo, R., Labita, M., Treves, A., and Uslenghi, M. The Nuclear to Host Galaxy Relation of High-Redshift Quasars. *Astrophysical Journal 660* (May 2007), 1039–1050.

[68] Krawczyk, C. M., Richards, G. T., Gallagher, S. C., Leighly, K. M., Hewett, P. C., Ross, N. P., and Hall, P. B. Mining for Dust in Type 1 Quasars. *Astronomical Journal 149* (June 2015), 203.

[69] Kukula, M. J., Dunlop, J. S., McLure, R. J., Miller, L., Percival, W. J., Baum, S. A., and O'Dea, C. P. A NICMOS imaging study of high-z quasar host

galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 326* (Oct. 2001), 1533–1546.

[70] Lasker, B. M., Lattanzi, M. G., McLean, B. J., Bucciarelli, B., Drimmel, R., Garcia, J., Greene, G., Guglielmetti, F., Hanley, C., Hawkins, G., Laidler, V. G., Loomis, C., Meakes, M., Mignani, R., Morbidelli, R., Morrison, J., Pannunzio, R., Rosenberg, A., Sarasso, M., Smart, R. L., Spagna, A., Sturch, C. R., Volpicelli, A., White, R. L., Wolfe, D., and Zacchei, A. The Second-Generation Guide Star Catalog: Description and Properties. *Astronomical Journal 136* (Aug. 2008), 735–766.

[71] Lawrence, A. Classification of active galaxies and the prospect of a unified phenomenology. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific 99* (May 1987), 309–334.

[72] Letawe, Y., Letawe, G., and Magain, P. Study of a homogeneous QSO sample: relations between the QSO and its host galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 403* (Apr. 2010), 2088–2104.

[73] Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Land, K., Bamford, S., Thomas, D., Raddick, M. J., Nichol, R. C., Szalay, A., Andreescu, D., Murray, P., and Vandenberg, J. Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 389* (Sept. 2008), 1179–1189.

[74] Lynds, R. The Absorption-Line Spectrum of 4c 05.34. *Astrophysical Journal Letters 164* (Mar. 1971), L73.

[75] Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T. M., Fey, A. L., Gontier, A.-M., Jacobs, C. S., Sovers, O. J., Archinal, B. A., and Charlot, P. The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. *Astronomical Journal 116* (July 1998), 516–546.

[76] Madau, P. Radiative transfer in a clumpy universe: The colors of high-redshift galaxies. *Astrophysical Journal 441* (Mar. 1995), 18–27.

[77] Madau, P., and Dickinson, M. Cosmic Star-Formation History. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics 52* (Aug. 2014), 415–486.

[78] Maehoenen, P. H., and Hakala, P. J. Automated Source Classification Using a Kohonen Network. *Astrophysical Journal Letters 452* (Oct. 1995), L77.

[79] Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Gebhardt, K., Green, R., Grillmair, C., Kormendy, J., and Lauer, T. The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers. *Astronomical Journal 115* (June 1998), 2285–2305.

[80] Maiolino, R., Schneider, R., Oliva, E., Bianchi, S., Ferrara, A., Mannucci, F., Pedani, M., and Roca Sogorb, M. A supernova origin for dust in a high-redshift quasar. *Nature 431* (Sept. 2004), 533–535.

[81] Malkan, M. A., and Sargent, W. L. W. The ultraviolet excess of Seyfert 1 galaxies and quasars. *Astrophysical Journal 254* (Mar. 1982), 22–37.

[82] Matthews, T. A., and Sandage, A. R. Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects. *Astrophysical Journal 138* (July 1963), 30.

[83] McCarthy, P. J., van Breugel, W., Spinrad, H., and Djorgovski, S. A correlation between the radio and optical morphologies of distant 3Cr radio galaxies. *Astrophysical Journal Letters 321* (Oct. 1987), L29–L33.

[84] McLure, R. Quasar Host Galaxies. *Cosmology, Galaxy Formation and Astroparticle Physics on the pathway to the SKA 294* (Apr. 2006), 57–61.

[85] Meiksin, A. Colour corrections for high-redshift objects due to intergalactic attenuation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 365* (Jan. 2006), 807–812.

[86] Meiksin, A., and White, M. The effects of ultraviolet background correlations on Lyα forest flux statistics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 350* (May 2004), 1107–1126.

[87] Mignard, F. The Gaia mission objectives, description, data processing. In *ADA 6 - Sixth Conference on Astronomical Data Analysis* (Sept. 2010), p. 10.

[88] Monet, D. G., Levine, S. E., Canzian, B., Ables, H. D., Bird, A. R., Dahn, C. C., Guetter, H. H., Harris, H. C., Henden, A. A., Leggett, S. K., Levison, H. F., Luginbuhl, C. B., Martini, J., Monet, A. K. B., Munn, J. A., Pier, J. R., Rhodes, A. R., Riepe, B., Sell, S., Stone, R. C., Vrba, F. J., Walker, R. L., Westerhout, G., Brucato, R. J., Reid, I. N., Schoening, W., Hartley, M., Read, M. A., and Tritton, S. B. The USNO-B Catalog. *Astronomical Journal 125* (Feb. 2003), 984–993.

[89] Oke, J. B., and Gunn, J. E. Secondary standard stars for absolute spectrophotometry. *Astrophysical Journal 266* (Mar. 1983), 713–717.

[90] Oke, J. B., and Sandage, A. Energy Distributions, K Corrections, and the Stebbins-Whitford Effect for Giant Elliptical Galaxies. *Astrophysical Journal 154* (Oct. 1968), 21.

[91] Overzier, R. A., Nesvadba, N. P. H., Dijkstra, M., Hatch, N. A., Lehnert, M. D., Villar-Martín, M., Wilman, R. J., and Zirm, A. W. Resolving the Optical Emission Lines of Lyα Blob "B1" at z = 2.38: Another Hidden Quasar. *Astrophysical Journal 771* (July 2013), 89.

[92] Padovani, P. The Radio Loud Fraction of QSOS and its Dependence on Magnitude and Redshift. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 263* (July 1993), 461.

[93] Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, É., Bailey, S., Ross, N. P., Myers, A. D., Strauss, M. A., Anderson, S. F., Arnau, E., Bautista, J., Bizyaev, D., Bolton, A. S., Bovy, J., Brandt, W. N., Brewington, H., Browstein, J. R., Busca, N., Capellupo, D., Carithers, W., Croft, R. A. C., Dawson, K., Delubac, T., Ebelke, G., Eisenstein, D. J., Engelke, P., Fan, X., Filiz Ak, N., Finley, H., Font-Ribera, A., Ge, J., Gibson, R. R., Hall, P. B., Hamann, F., Hennawi, J. F., Ho, S., Hogg, D. W., Ivezić, Ž., Jiang, L., Kimball, A. E., Kirkby, D., Kirkpatrick, J. A., Lee, K.-G., Le Goff, J.-M., Lundgren, B., MacLeod, C. L., Malanushenko, E., Malanushenko, V., Maraston, C., McGreer, I. D., McMahon, R. G., Miralda-Escudé, J., Muna, D., Noterdaeme, P.,

Oravetz, D., Palanque-Delabrouille, N., Pan, K., Perez-Fournon, I., Pieri, M. M., Richards, G. T., Rollinde, E., Sheldon, E. S., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Slosar, A., Shelden, A., Shen, Y., Simmons, A., Snedden, S., Suzuki, N., Tinker, J., Viel, M., Weaver, B. A., Weinberg, D. H., White, M., Wood-Vasey, W. M., and Yèche, C. The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog: ninth data release. *Astronomy and Astrophysics 548* (Dec. 2012), A66.

[94] Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, É., Ross, N. P., Myers, A. D., Streblyanska, A., Bailey, S., Hall, P. B., Strauss, M. A., Anderson, S. F., Bizyaev, D., Borde, A., Brinkmann, J., Bovy, J., Brandt, W. N., Brewington, H., Brownstein, J. R., Cook, B. A., Ebelke, G., Fan, X., Filiz Ak, N., Finley, H., Font-Ribera, A., Ge, J., Hamann, F., Ho, S., Jiang, L., Kinemuchi, K., Malanushenko, E., Malanushenko, V., Marchante, M., McGreer, I. D., McMahon, R. G., Miralda-Escudé, J., Muna, D., Noterdaeme, P., Oravetz, D., Palanque-Delabrouille, N., Pan, K., Perez-Fournon, I., Pieri, M., Riffel, R., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Simmons, A., Viel, M., Weaver, B. A., Wood-Vasey, W. M., Yèche, C., and York, D. G. The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog: tenth data release. *Astronomy and Astrophysics 563* (Mar. 2014), A54.

[95] Pâris, I., Petitjean, P., Ross, N. P., Myers, A. D., Aubourg, É., Streblyanska, A., Bailey, S., Armengaud, É., Palanque-Delabrouille, N., Yèche, C., Hamann, F., Strauss, M. A., Albareti, F. D., Bovy, J., Bizyaev, D., Niel Brandt, W., Brusa, M., Buchner, J., Comparat, J., Croft, R. A. C., Dwelly, T., Fan, X., Font-Ribera, A., Ge, J., Georgakakis, A., Hall, P. B., Jiang, L., Kinemuchi, K., Malanushenko, E., Malanushenko, V., McMahon, R. G., Menzel, M.-L., Merloni, A., Nandra, K., Noterdaeme, P., Oravetz, D., Pan, K., Pieri, M. M., Prada, F., Salvato, M., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Simmons, A., Viel, M., Weinberg, D. H., and Zhu, L. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog: Twelfth data release. *Astronomy and Astrophysics 597* (Jan. 2017), A79.

[96] Patnaik, A. R., Browne, I. W. A., Wilkinson, P. N., and Wrobel, J. M.

Interferometer phase calibration sources. I - The region 35-75 deg. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 254* (Feb. 1992), 655–676.

[97] Patterson, F. S. The Luminosity Gradient of Messier 33. *Harvard College Observatory Bulletin 914* (Dec. 1940), 9–10.

[98] Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., and Rix, H.-W. Detailed Decomposition of Galaxy Images. II. Beyond Axisymmetric Models. *Astronomical Journal 139* (June 2010), 2097–2129.

[99] Phillipps, S., Davies, J. I., and Disney, M. J. The visibility of high-redshift galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 242* (Jan. 1990), 235–240.

[100] Polletta, M., Tajer, M., Maraschi, L., Trinchieri, G., Lonsdale, C. J., Chiappetti, L., Andreon, S., Pierre, M., Le Fèvre, O., Zamorani, G., Maccagni, D., Garcet, O., Surdej, J., Franceschini, A., Alloin, D., Shupe, D. L., Surace, J. A., Fang, F., Rowan-Robinson, M., Smith, H. E., and Tresse, L. Spectral Energy Distributions of Hard X-Ray Selected Active Galactic Nuclei in the XMM-Newton Medium Deep Survey. *Astrophysical Journal 663* (July 2007), 81–102.

[101] Rauch, M. The Lyman Alpha Forest in the Spectra of QSOs. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics 36* (1998), 267–316.

[102] Richards, G. T., Fan, X., Newberg, H. J., Strauss, M. A., Vanden Berk, D. E., Schneider, D. P., Yanny, B., Boucher, A., Burles, S., Frieman, J. A., Gunn, J. E., Hall, P. B., Ivezić, Ž., Kent, S., Loveday, J., Lupton, R. H., Rockosi, C. M., Schlegel, D. J., Stoughton, C., SubbaRao, M., and York, D. G. Spectroscopic Target Selection in the Sloan Digital Sky Survey: The Quasar Sample. *Astronomical Journal 123* (June 2002), 2945–2975.

[103] Richards, G. T., Hall, P. B., Vanden Berk, D. E., Strauss, M. A., Schneider, D. P., Weinstein, M. A., Reichard, T. A., York, D. G., Knapp, G. R., Fan, X., Ivezić, Ž., Brinkmann, J., Budavári, T., Csabai, I., and Nichol, R. C. Red and Reddened Quasars in the Sloan Digital Sky Survey. *Astronomical Journal 126* (Sept. 2003), 1131–1147.

[104] Richards, G. T., Strauss, M. A., Fan, X., Hall, P. B., Jester, S., Schneider, D. P., Vanden Berk, D. E., Stoughton, C., Anderson, S. F., Brunner, R. J., Gray, J., Gunn, J. E., Ivezic, Ž., Kirkland, M. K., Knapp, G. R., Loveday, J., Meiksin, A., Pope, A., Szalay, A. S., Thakar, A. R., Yanny, B., York, D. G., Barentine, J. C., Brewington, H. J., Brinkmann, J., Fukugita, M., Harvanek, M., Kent, S. M., Kleinman, S. J., Krzesinski, J., Long, D. C., Lupton, R. H., Nash, T., Neilsen, Jr., E. H., Nitta, A., Schlegel, D. J., and Snedden, S. A. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Survey: Quasar Luminosity Function from Data Release 3. *Astronomical Journal 131* (June 2006), 2766–2787.

[105] Roeser, S., Demleitner, M., and Schilbach, E. The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS). *Astronomical Journal 139* (June 2010), 2440–2447.

[106] Rosario, D. J., Trakhtenbrot, B., Lutz, D., Netzer, H., Trump, J. R., Silverman, J. D., Schramm, M., Lusso, E., Berta, S., Bongiorno, A., Brusa, M., Förster-Schreiber, N. M., Genzel, R., Lilly, S., Magnelli, B., Mainieri, V., Maiolino, R., Merloni, A., Mignoli, M., Nordon, R., Popesso, P., Salvato, M., Santini, P., Tacconi, L. J., and Zamorani, G. The mean star-forming properties of QSO host galaxies. *Astronomy and Astrophysics 560* (Dec. 2013), A72.

[107] Ross, N. P., McGreer, I. D., White, M., Richards, G. T., Myers, A. D., Palanque-Delabrouille, N., Strauss, M. A., Anderson, S. F., Shen, Y., Brandt, W. N., Yèche, C., Swanson, M. E. C., Aubourg, É., Bailey, S., Bizyaev, D., Bovy, J., Brewington, H., Brinkmann, J., DeGraf, C., Di Matteo, T., Ebelke, G., Fan, X., Ge, J., Malanushenko, E., Malanushenko, V., Mandelbaum, R., Maraston, C., Muna, D., Oravetz, D., Pan, K., Pâris, I., Petitjean, P., Schawinski, K., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Silverman, J. D., Simmons, A., Snedden, S., Streblyanska, A., Suzuki, N., Weinberg, D. H., and York, D. The SDSS-III

Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: The Quasar Luminosity Function from Data Release Nine. *Astrophysical Journal 773* (Aug. 2013), 14.

[108] Ross, N. P., Myers, A. D., Sheldon, E. S., Yèche, C., Strauss, M. A., Bovy, J., Kirkpatrick, J. A., Richards, G. T., Aubourg, É., Blanton, M. R., Brandt, W. N., Carithers, W. C., Croft, R. A. C., da Silva, R., Dawson, K., Eisenstein, D. J., Hennawi, J. F., Ho, S., Hogg, D. W., Lee, K.-G., Lundgren, B., McMahon, R. G., Miralda-Escudé, J., Palanque-Delabrouille, N., Pâris, I., Petitjean, P., Pieri, M. M., Rich, J., Roe, N. A., Schiminovich, D., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Slosar, A., Suzuki, N., Tinker, J. L., Weinberg, D. H., Weyant, A., White, M., and Wood-Vasey, W. M. The SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Quasar Target Selection for Data Release Nine. *Astrophysical Journal Supplement Series 199* (Mar. 2012), 3.

[109] Sandage, A. *The Hubble atlas of galaxies.* 1961.

[110] Sandage, A. *Classification and Stellar Content of Galaxies Obtained from Direct Photography.* the University of Chicago Press, Jan. 1975, p. 1.

[111] Sandage, A., Freeman, K. C., and Stokes, N. R. The Intrinsic Flattening of e, so, and Spiral Galaxies as Related to Galaxy Formation and Evolution. *Astrophysical Journal 160* (June 1970), 831.

[112] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., and Davis, M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *Astrophysical Journal 500* (June 1998), 525–553.

[113] Schmidt, M. 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift. *Nature 197* (Mar. 1963), 1040.

[114] Schneider, D. P., Fan, X., Hall, P. B., Jester, S., Richards, G. T., Stoughton, C., Strauss, M. A., SubbaRao, M., Vanden Berk, D. E., Anderson, S. F., Brandt, W. N., Gunn, J. E., Gray, J., Trump, J. R., Voges, W., Yanny, B., Bahcall, N. A., Blanton, M. R., Boroski, W. N., Brinkmann, J., Brunner, R., Burles, S., Castander, F. J., Doi, M.,

Eisenstein, D., Frieman, J. A., Fukugita, M., Heckman, T. M., Hennessy, G. S., Ivezić, Ž., Kent, S., Knapp, G. R., Lamb, D. Q., Lee, B. C., Loveday, J., Lupton, R. H., Margon, B., Meiksin, A., Munn, J. A., Newberg, H. J., Nichol, R. C., Niederste-Ostholt, M., Pier, J. R., Richmond, M. W., Rockosi, C. M., Saxe, D. H., Schlegel, D. J., Szalay, A. S., Thakar, A. R., Uomoto, A., and York, D. G. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. II. First Data Release. *Astronomical Journal 126* (Dec. 2003), 2579–2593.

[115] Schneider, D. P., Richards, G. T., Hall, P. B., Strauss, M. A., Anderson, S. F., Boroson, T. A., Ross, N. P., Shen, Y., Brandt, W. N., Fan, X., Inada, N., Jester, S., Knapp, G. R., Krawczyk, C. M., Thakar, A. R., Vanden Berk, D. E., Voges, W., Yanny, B., York, D. G., Bahcall, N. A., Bizyaev, D., Blanton, M. R., Brewington, H., Brinkmann, J., Eisenstein, D., Frieman, J. A., Fukugita, M., Gray, J., Gunn, J. E., Hibon, P., Ivezic, Ž., Kent, S. M., Kron, R. G., Lee, M. G., Lupton, R. H., Malanushenko, E., Malanushenko, V., Oravetz, D., Pan, K., Pier, J. R., Price, III, T. N., Saxe, D. H., Schlegel, D. J., Simmons, A., Snedden, S. A., SubbaRao, M. U., Szalay, A. S., and Weinberg, D. H. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release. *Astronomical Journal 139* (June 2010), 2360.

[116] Schneider, P. *Extragalactic Astronomy and Cosmology.* 2006.

[117] Schramm, M., Wisotzki, L., and Jahnke, K. Host galaxies of bright high redshift quasars: luminosities and colours. *Astronomy and Astrophysics 478* (Feb. 2008), 311–319.

[118] Sérsic, J. L. Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. *Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina 6* (1963), 41.

[119] Shen, Y., Greene, J. E., Strauss, M. A., Richards, G. T., and Schneider, D. P. Biases in Virial Black Hole Masses: An SDSS Perspective. *Astrophysical Journal 680* (June 2008), 169–190.

[120] Shen, Y., Richards, G. T., Strauss, M. A., Hall, P. B., Schneider, D. P., Snedden, S., Bizyaev, D., Brewington, H., Malanushenko, V., Malanushenko, E., Oravetz, D., Pan, K., and Simmons, A. A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7. *Astrophysical Journal Supplement Series 194* (June 2011), 45.

[121] Souchay, J., Andrei, A. H., Barache, C., Bouquillon, S., Gontier, A.-M., Lambert, S. B., Le Poncin-Lafitte, C., Taris, F., Arias, E. F., Suchet, D., and Baudin, M. The construction of the large quasar astrometric catalogue (LQAC). *Astronomy and Astrophysics 494* (Feb. 2009), 799–815.

[122] Souchay, J., Andrei, A. H., Barache, C., Bouquillon, S., Suchet, D., Taris, F., and Peralta, R. The second release of the Large Quasar Astrometric Catalog (LQAC-2). *Astronomy and Astrophysics 537* (Jan. 2012), A99.

[123] Souchay, J., Andrei, A. H., Barache, C., Kalewicz, T., Gattano, C., Coelho, B., Taris, F., Bouquillon, S., and Becker, O. The third release of the Large Quasar Astrometric Catalog (LQAC-3): a compilation of 321 957 objects. *Astronomy and Astrophysics 583* (Nov. 2015), A75.

[124] Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Shapley, A. E., Pettini, M., Dickinson, M., and Giavalisco, M. Lyα Imaging of a Proto-Cluster Region at <z>=3.09. *Astrophysical Journal 532* (Mar. 2000), 170–182.

[125] Taris, F., Andrei, A., Klotz, A., Vachier, F., Côte, R., Bouquillon, S., Souchay, J., Lambert, S., Anton, S., Bourda, G., and Coward, D. Optical monitoring of extragalactic sources for linking the ICRF and the future Gaia celestial reference frame. I. Variability of ICRF sources. *Astronomy and Astrophysics 552* (Apr. 2013), A98.

[126] Taris, F., Andrei, A., Roland, J., Klotz, A., Vachier, F., and Souchay, J. Long-term R and V-band monitoring of some suitable targets for the link between ICRF and the future Gaia celestial reference frame. *Astronomy and Astrophysics 587* (Mar. 2016), A112.

[127] Taris, F., Souchay, J., Andrei, A. H., Bernard, M., Salabert, M., Bouquillon, S., Anton, S., Lambert, S. B., Gontier, A.-M., and

Barache, C. Astrophotometric variability of CFHT-LS Deep 2 QSOs. *Astronomy and Astrophysics 526* (Feb. 2011), A25.

[128] Tolman, R. C. On the Estimation of Distances in a Curved Universe with a Non-Static Line Element. *Proceedings of the National Academy of Science 16* (July 1930), 511–520.

[129] Tolman, R. C. *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology.* 1934.

[130] Tremonti, C. A., Moustakas, J., and Diamond-Stanic, A. M. The Discovery of 1000 km s^{-1} Outflows in Massive Poststarburst Galaxies at z=0.6. *Astrophysical Journal Letters 663* (July 2007), L77–L80.

[131] Urry, C. M., and Padovani, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific 107* (Sept. 1995), 803.

[132] Vanden Berk, D. E., Richards, G. T., Bauer, A., Strauss, M. A., Schneider, D. P., Heckman, T. M., York, D. G., Hall, P. B., Fan, X., Knapp, G. R., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bernardi, M., Briggs, J. W., Brinkmann, J., Brunner, R., Burles, S., Carey, L., Castander, F. J., Connolly, A. J., Crocker, J. H., Csabai, I., Doi, M., Finkbeiner, D., Friedman, S., Frieman, J. A., Fukugita, M., Gunn, J. E., Hennessy, G. S., Ivezić, Ž., Kent, S., Kunszt, P. Z., Lamb, D. Q., Leger, R. F., Long, D. C., Loveday, J., Lupton, R. H., Meiksin, A., Merelli, A., Munn, J. A., Newberg, H. J., Newcomb, M., Nichol, R. C., Owen, R., Pier, J. R., Pope, A., Rockosi, C. M., Schlegel, D. J., Siegmund, W. A., Smee, S., Snir, Y., Stoughton, C., Stubbs, C., SubbaRao, M., Szalay, A. S., Szokoly, G. P., Tremonti, C., Uomoto, A., Waddell, P., Yanny, B., and Zheng, W. Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey. *Astronomical Journal 122* (Aug. 2001), 549–564.

[133] Vayner, A., Wright, S. A., Do, T., Larkin, J. E., Armus, L., and Gallagher, S. C. Providing Stringent Star Formation Rate Limits of z $\sim$ 2 QSO Host Galaxies at High Angular Resolution. *Astrophysical Journal 821* (Apr. 2016), 64.

[134] Vernet, J., Fosbury, R. A. E., Villar-Martín, M., Cohen, M. H., Cimatti, A., di Serego Alighieri, S., and Goodrich, R. W. Radio galaxies at z ˜ 2.5: Results from Keck spectropolarimetry. *Astronomy and Astrophysics 366* (Jan. 2001), 7–25.

[135] Véron-Cetty, M.-P., and Véron, P. A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition. *Astronomy and Astrophysics 455* (Aug. 2006), 773–777.

[136] Véron-Cetty, M.-P., and Véron, P. A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition. *Astronomy and Astrophysics 518* (July 2010), A10.

[137] White, R. L., Becker, R. H., Helfand, D. J., and Gregg, M. D. A Catalog of 1.4 GHz Radio Sources from the FIRST Survey. *Astrophysical Journal 475* (Feb. 1997), 479–493.

[138] Wilkinson, P. N., Browne, I. W. A., Patnaik, A. R., Wrobel, J. M., and Sorathia, B. Interferometer phase calibration sources - III. The regions $+20 \leq \delta_{B1950} \leq +35$ deg and $+75 \leq \delta_{B1950} \leq +90$ deg. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 300* (Nov. 1998), 790–816.

[139] Wilson, A. S., and Colbert, E. J. M. The Origin of Powerful Radio Sources. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #186* (May 1995), vol. 27 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, p. 830.

[140] Wisotzki, L. Quasar spectra and the K correction. *Astronomy and Astrophysics 353* (Jan. 2000), 861–866.

[141] Wolfe, A. M., Gawiser, E., and Prochaska, J. X. Damped Ly α Systems. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics 43* (Sept. 2005), 861–918.

[142] Yajima, H., Li, Y., and Zhu, Q. Extended Lyα Emission from Interacting Galaxies at High Redshifts. *Astrophysical Journal 773* (Aug. 2013), 151.

[143] York, D. G., Straka, L. A., Bishof, M., Kuttruff, S., Bowen, D., Kulkarni, V. P., Subbarao, M., Richards, G., Vanden Berk, D., Hall, P. B., Heckman, T., Khare, P., Quashnock, J., Ghering, L., and Johnson, S. Galaxies with background QSOs - I. A search for strong galactic Hα lines. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 423* (July 2012), 3692–3708.

Apêndice A

Artigo Publicado na revista A & A

A&A 583, A75 (2015)
DOI: 10.1051/0004-6361/201526092
© ESO 2015

Astronomy & Astrophysics

The third release of the Large Quasar Astrometric Catalog (LQAC-3): a compilation of 321 957 objects⋆

J. Souchay[1], A. H. Andrei[1,2,3], C. Barache[1], T. Kalewicz[1], C. Gattano[1], B. Coelho[3], F. Taris[1], S. Bouquillon[1], and O. Becker[1]

[1] Observatoire de Paris, SYRTE/UMR-8630 CNRS/UPMC, 75014 Paris, France
e-mail: Jean.Souchay@obspm.fr
[2] Observatorio Nacional/MCT, 20921-400 Rio de Janeiro, Brazil
[3] Observatorio do Valongo, UFRJ, 20080-090 Rio de Janeiro, Brazil

Received 13 March 2015 / Accepted 18 June 2015

ABSTRACT

Context. From an astrometric point of view, quasars constitute quasi-ideal reference objects in the celestial sphere, with an a priori absence of proper motion. Since the second release of the Large Quasar Astrometric Catalog (LQAC), a large number of quasars have been discovered, in particular with the upcoming new release of the SDSS quasars catalog.
Aims. Following the same procedure as in the two previous releases of the LQAC, our aim was to compile all the quasars recorded until the present date, with accurate recomputation of their equatorial coordinates in the ICRS and with the maximum of information concerning their physical properties, such as the redshift, the photometry, and the absolute magnitudes.
Methods. For the purpose above, we carried out the cross-identification between the 9 catalogs of quasars chosen for their huge number of objects, including all the available data related to magnitudes, radiofluxes, and redshifts. This cross identification was particularly delicate because of a slight change in coordinates between the objects common to two successive releases of the SDSS and the elimination of some of them. Equatorial coordinates were recomputed more accurately according to the algorithms used for the elaboration of the Large Quasar Reference Frame (LQRF). Moreover, absolute magnitudes and morphological indexes of the new objects were given, following the same method as in the LQAC-2.
Results. Our final catalog, called LQAC-3, contains 321 957 objects including a small proportion of AGNs (14 128) and BLLac (1183). This is roughly 70% more than the number of objects recorded in the LQAC-2.
Conclusions. The LQAC-3 will be useful for the astronomical community since it gives the most complete information available about the whole set of already recorded quasars, with emphasis on the precision and accuracy of their coordinates with respect to the ICRF2.

Key words. catalogs – astrometry – reference systems – quasars: general – astronomical databases: miscellaneous

1. Introduction

Quasars have become fundamental objects both from an astrophysical and an astrometric point of view. First they are necessary for our understanding of galaxy evolution and of the expansion of the universe. At the same time, they constitute quasi-ideal geometric reference sources in the celestial sphere, because of the absence of proper motion even at the submilliarcsecond level of position obtained by modern techniques such as Very Long Baseline Interferometry (VLBI). For these reasons, there has been continuous effort for almost three decades by Véron-Cetty & Véron (1984, 2010) to construct an overall compilation of all the quasars detected so far. In their last release in 2010, the 13th one, their catalog included 133 336 quasars and 34 231 active galaxies.

With the same aim, Souchay et al. (2009, 2012) constructed two successive versions of a compilation of quasars called Large Quasar Astrometric Catalog (LQAC). The last one, called LQAC-2, contains 188 504 objects. Véron-Cetty & Véron (2010) have contested that the LQAC is not, strictly speaking, a quasar catalog because several of the included objects (2921) have no optical identification or measured redshift. This is itself contestable. Indeed, most of these last objects are categorized as quasars by the VLBI community for their very pointlike aspect and very accurate coordinates at radio wavelengths bands (generally S and X). In consequence they satisfy the original definition of "quasi stellar source", even if their redshift is not systematically available.

Moreover, the definition of a quasar has not been settled very well. For instance, we notice that in their studies, Véron-Cetty & Véron (2010) define a quasar in a purely arbitrary manner as a starlike object or an object with a starlike nucleus that is brighter than $M_B = -22.25$, assuming a well established cosmology. Moreover they recognize that the limit between quasars and active galactic nuclei (AGNs) is far from being obvious in some cases. According to their definition, some objects would move from QSO to AGN and vice versa if the apparent magnitude B becomes more precise or if cosmological parameters for calculating M_B as H_0,q_0 change slightly.

In a different way, in the two recent versions DR9Q (Pâris et al. 2012) and DR10Q (Pâris et al. 2014) of the SDSS quasar catalog, a quasar is also arbitrarily defined as an object with luminosity $M_i[z = 2] \leq -20.5$, which either displays at least one emission line with $FWMH \geq 500$ km s^{-1} or, if not, presents significant absorption features that characterize a quasar without ambiguity thanks to the Lyman-α forest or to BAL troughs.

To avoid the rigid (and not physically satisfactory) definitions of quasars above, as well as to avoid the uncertainty in

⋆ The catalog is available at the CDS via anonymous ftp to cdsarc.u-strasbg.fr (130.79.128.5) or via http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/583/A75

A&A 583, A75 (2015)

the status of the objects, we decided in this paper, as in the LQAC-2, to include in the LQAC-3 the objects that satisfy the conditions either of Véron-Cetty & Véron or those of the SDSS mentioned above, and also compact extragalactic objects as the AGN's recorded in Véron-Cetty & Véron (2010). Nevertheless we give for each object of our compilation information that allows the user to have the possibility of categorizing it as a quasar according to our considerations. This is why, in addition to usual data, such as magnit udes and redshift, we give complementary information, such as the absolute magnitudes at two wavelengths M_B and M_I and morphology indexes (sharpness, skewness, roundness).

2. Inclusion of the recent release of the SDSS quasar catalog

All the new quasars included in LQAC-3 and not in LQAC-2 come exclusively from the SDSS, and for a large proportion of the last version DR10Q of the SDSS-III. The DR10Q itself has been constructed starting from the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) of the SDSS-III. BOSS is based on imaging released in SDSS-DR8 (Aihara et al. 2011), which corresponds to the SDSS-I/II with an extension to the South Galactic CAP (SGC). The DR10Q was built from visual inspection of the spectra of all the objects targeted as quasars by SDSSIII/BOSS, together with objects clearly satisfying $z \geq 2$ by the SDSS pipeline among galaxy targets (Bolton et al. 2012). The visual inspection process is described in detail in Pâris et al. (2012). Starting from an initial list of 316 947 quasar targets that were visually inspected, 166 583 objects have been identified as QSOs. Then, 545 supplementary ones were clearly classified as QSOs but with an uncertain value of the redshift, whereas 1370 ones present good arguments to definitely be considered as quasars. These two last categories have not been taken into consideration in our sample.

In fact our total SDSS sample of quasars belonging to our LQAC-3 catalog comes from three different sources: the DR7Q catalog (Schneider et al. 2010) containing 105 783 objects, the DR10Q (Pâris et al. 2014) containing 166 583 objects, and the remaining SDSS objects not included in these two last versions but already recognized as SDSS quasars already in the last version of the Véron-Cetty & Véron (2010) catalog. Considering that 16 420 objects were shared with the DR7Q and DR10Q catalogs must be counted only once, our total number of SDSS quasars finally reaches 262 535 objects, which is more than twice the amount of SDSS quasars in the LQAC-2 catalog (Souchay et al. 2012).

3. Cross-identifications between catalogs

Because the SDSS is by far the leading catalog included in the LQAC, as well as the exclusive contributor of the new objects belonging to the third version of the LQAC with respect to the second one, we find it judicious to give the information concerning both the cross-identification between the LQAC-2 and LQAC-3 in the following, as well as an updated study of common quasars between the SDSS and the other catalogs present in the LQAC compilation.

3.1. Cross-identifications with the LQAC-2

As already explained in a preceding section, the quasars present in the LQAC-3 and missing in the LQAC-2 correspond exclusively to objects that were newly identified in the recent updates of the SDSS, namely the DR7Q-DR10Q compilation. Thus the addition of these new quasars may be considered as a single and direct task, with no particular difficulty. In fact, this task is more complicated than expected for two reasons. First, the coordinates of all the SDSS objects have changed from the DR8 release to which the LQAC-2 is referred, to the DR7Q-DR10Q combined release to which the LQAC-3 is related. Second, some of the SDSS quasars present in the LQAC-2 were no longer included in our SDSS selected sample for the LQAC-3, because their status as quasars was finally rejected (Pâris, priv. comm.) as explained below.

Thus starting from the 187 504 objects of the LQAC-2, only 43 870 have all their data (coordinates, redshift, photometry, etc.) that remained unchanged because they do not belong to the SDSS. Among the 143 634 remaining SDSS objects, 1650 have been eliminated in the LQAC-3 for they are no longer included in the combined DR7Q-DR10Q release of the SDSS, although they were present in the SDSS release of the LQAC-2. They must be considered as outliers, mainly stars, ejected after a meticulous spectroscopic check. Finally this left us with a set of 141 984 SDSS quasars whose the equatorial coordinates have systematically changed. For these quasars a cross-identification was essential, in particular for attributing the same LQAC number in both the LQAC-2 and LQAC-3. Generally, the coordinates' differences both in right ascension and declination, at the level of $0\farcs1$ or less do not permit any ambiguity in the correspondence between the quasars shared by the LQAC-2 and LQAC-3.

3.2. Cross-identification between SDSS and other catalogs

The predominant weight of the quasars of the SDSS catalog in the total LQAC-3 sample leads to the natural question of their membership in the other constituent catalogs of the compilation. In Table 1 we present the number of the common quasars. We find only 506 sources in common with the ICRF2 catalog, which represents a mere 14.8% of the ICRF2. This is explained easily for two: first the ICRF2 has its 3414 sources regularly dispatched in the whole celestial sphere, ensuring an all-sky coverage, whereas the SDSS survey, regardless of the release concerned is concentrated in a limited area of the sky, roughly one-third. Second, the sources included in the ICRF2 catalog are observed in VLBI radio bands, namely S and X, which does not guarantee that they have an optical counterpart bright enough to be detected with the SDSS pipeline. This also remark prevails for the three other radio loud quasars of the VLBA (B), the VLA (C), and the JVAS (D), with relative common detection ratios of 13.2%, 19.2%, and 21.3%.

4. Celestial reference frame coordinates

In addition to delivering the equatorial coordinates coming from the original compiled catalogs, the LQAC-3 is constructed to offer the most precise available astrometric equatorial coordinates for each of the quasars included. This fulfills the goal of unmistakably finding any object without introducing position ambiguities.

At the same time, the large number of quasars present in the LQAC-3 catalog enables the opposite to be equally served: once their position has been optimized, the overall sample of quasars included can be considered as a realization of the International Celestial Reference System (ICRS) in the optical band, i.e. a secondary representation of the International Celestial Reference Frame (ICRF), defined by Very-long base interferometry in the

Table 1. Number of quasars for each catalog of the LQAC-3 compilation with the corresponding number of quasars in common with the SDSS catalog.

Catalog name	Flag	Nature	Nbs of quasars (LQAC-3)	Nb. of quasars common with SDSS
ICRF2	A	radio	3414	506
VLBA	B	radio	7213	951
VLA	C	radio	1858	356
JVAS	D	radio	2118	451
2QZ	F	optical	23 660	3271
2df-SDSS LRG	G	optical	9058	1923
FIRST	H	radio	969	801
HB	I	opt. and radio	6720	2102
2MASS	J	infrared	21 884	18 433
GSC2.3	K	optical	144 508	113 213
B1.0	L	optical	139 192	111 121
V&V	M	optic. and radio	79 692	25 191

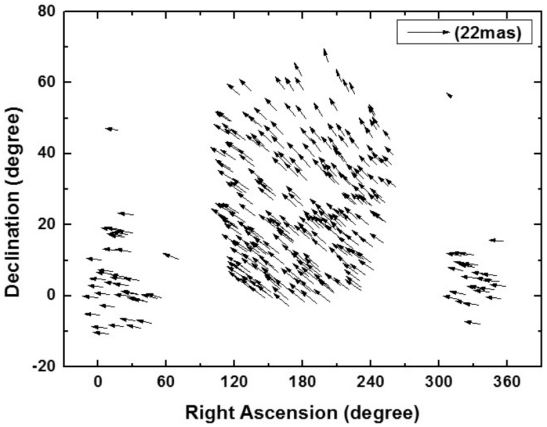

Fig. 1. Vector map corresponding to the equatorial coordinate variation caused by the global rotations away from the SDSS quasar frame to the ICRF2. Owing to the very large number of sources, only 314 are represented, drawing the 1:1000 sample randomly (the systematic nature of the rotations is clearly seen).

radio domain. For the purpose of the astrometric optimization above, we follow the same steps as in the construction of the Large Quasar Reference Frame, the LQRF and LQRF2 (Andrei et al. 2009; Souchay et al. 2012). They are summarized below.

Since the original optical coordinates come from several surveys, generally non-astrometric ones, a preliminary adjustment to the J2000 standard is made when necessary. Successive steps are then undertaken to derive equatorial ICRF aligned coordinates. First, the optical counterparts of the quasars are retrieved in large deep catalogs: the USNO B1.0 (Monet et al. 2003), the GSC2.3 (Lasker et al. 2008), and SDSS.Then a corresponding local neighborhood centered on the quasar is aligned to the UCAC reference frame (Zacharias et al. 2004), which is itself linked to the HIPPARCOS celestial frame. Next, a large sample of quasars with radio positions directly tied to the ICRF is selected. The sample is formed by the ICRF sources themselves, plus the VLBA and VLA calibrators. The precision of the radio astrometric coordinates is at the milli-arcsecond level or better. Thus the systematic difference with the optical coordinates can be used to derive global corrections to the latter. This assumes that the optical-to-radio displacement of centroids has no preferred direction and is negligible on average and on a global scale. Such a sample of quasars with optical coordinates tied to the UCAC frame and radio coordinates tied to the ICRF is henceforth used to derive global global corrections to the optical coordinates of all the quasars. The slow rotation of the HIPPARCOS frame and misalignments of the UCAC frame are corrected by deriving the direction cosines of the rotation matrix plus an equatorial translation. Recurrent zonal patterns are represented and corrected using spherical harmonic functions. Zonal warps are corrected by using average differences obtained in large, numerically representative spherical caps. At all steps, magnitude and color corrections were also considered.

This process was followed for the sources already present in the LQAC-2 edition. Since the optical positions are the same and the ICRF orientation has not changed, the corresponding prior LQRF positions have also been maintained. As explained in an earlier section, the new optical sources in the present LQAC-3 edition come exclusively from new SDSS Data release. For these the same process as described above was followed, except the first step, namely the local adjustment to the UCAC frame. The reason is that the former versions of the LQRF (Andrei et al. 2009) verified that the precision and accuracy of the UCAC and SDSS catalogs are comparable. The SDSS positions were kept as a starting point for the following steps of global corrections, thus avoiding the introduction of spurious terms of local adjustment, magnitude, and color.

The direction cosines around the ICRF axis Ox and Oy (old equinox and contra-equinox directions) are small. On the other hand, the corrections to the origins of right ascension and declination are significant: their values are -9.1 ± 1.8 mas, and 4.1 ± 2.0 mas. respectively.

The three rotations (optical minus radio, positive, anticlockwise) and the equatorial translation were applied and the spherical harmonic procedures then followed. Results can be seen in Fig. 1. Recurrent dependences on right ascension, declination, and magnitude were probed for. As a result the zonal terms are found to not be significant, and no corresponding correction was applied. None of the terms is at the same time larger than 50 mas and significant above 3σ. The terms are larger in declination, probably because of the uneven latitudinal distribution. In right ascension the high frequency terms are more important, probably because they are better determined in the high-density, but space-confined, DR10Q distribution.

The magnitude terms are also small and do not present any significant behavior, indicating that the magnitude equation present in earlier DR version is very mitigated for the DR10Q. Finally, systematic local deviations from the original equatorial coordinates are calculated as the average between the radio and optical counterparts of the sources common to the ICRF and the DR10Q. We require at least five sources to calculate the average. This is easily attained in a small radius within the densest part of the SDSS, but the radius must be taken as progressively larger in the most recent, less populated regions of the DR10Q (Fig. 2).

As expected, the systematic corrections, as given by the total averages, are small (-0.9 mas in right ascension. and 1.0 mas in declination), nevertheless the resulting average displacement is 54.5 ± 12.8 mas (Fig. 3).) The average radius of the circles within which the averages were calculated was 4.7°, and the distribution of the standard deviations to the mean values is markedly Poisson-like with a peak at 14.7 mas. The combination of corrections for the global rotation and for the systematic local deviations is effective, and the mean distance between the ICRF and LQRF positions is slashed to 21.6+/−13.4 mas.

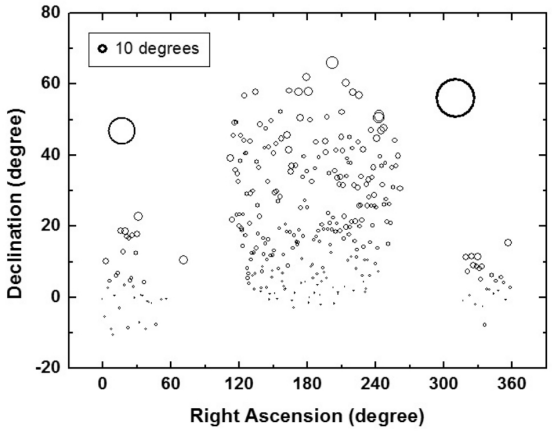

Fig. 2. Graphic representation of the neighborhoods in which the remaining local zonal position corrections are removed. The mean neighborhood is 4.7 deg, and there are only 13.6% neighborhood radii larger than 6deg. As before, owing to the large number of quasars, the sample is a representation 1:1000, to 314 elements (since the SDSS is tightly packed, this representation remains adequate).

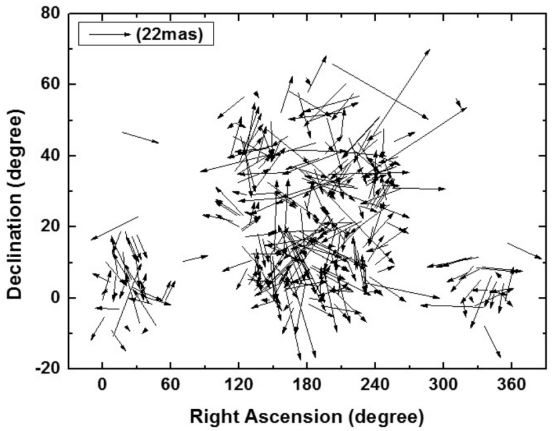

Fig. 3. Vector map corresponding to the local zonal position corrections. As before, the whole population of quasars is sampled at rate 1:1000. The main text discusses the removal of global rotations and the absence of significant recurrent zonal terms.

The first two releases of the *Gaia* catalog, scheduled for 2016 and 2017, will contain objects with acceptable formal standard errors of positions. Thanks to the faintness of its objects, the LQRF will therefore keep on providing a direct realization of the ICRS in the optical window after this term. Examples of it usefulness are related to the *Gaia* mission, to better locate targets of opportunity either spotted by *Gaia* or instead to be searched among the vast number of *Gaia* single observations. Naturally in later issues, the catalog of quasars provided by *Gaia* will supersede the LQRF. The latter will still be useful for providing a confirmation of the alignment to the ICRF, which will be done directly by Gaia (Bourda et al. 2011) and independently in the LQRF via star catalogs.

5. Determination of absolute magnitudes

Given the piecewise information available for quasars, because of the enormous distances, absolute magnitudes are key parameters for modeling masses and sizes. In the present version, we follow the same approach as in the previous versions of the LQAC by determining the absolute magnitudes. On that, the apparent magnitude is scaled up by the distance, minus the extinction, whereas a correction factor compensates for the relativistic doppler shift. The expression below results in

$$M = m + 5 - 5\log D_{\rm L} - A - K \quad (1)$$

where M and m are respectively the absolute and apparent magnitudes of the quasars at a given bandpass, $D_{\rm L}$ is the luminosity distance, A represents the galactic extinction, and K (usually termed as K-correction) is the effect of the redshift on the part of the spectrum corresponding to the filter through which M is determined.

The infrared attenuation atmospheric gap makes this window favorable for observing faint sources. For quasar detectability, the infrared has the added advantage of being free of Lyman-alpha absorption up to high redshifts, and on the other hand, it is a relatively line-free region at the rest frame of emission. As a result, the I magnitude is often used in mass-luminosity and mass-radius model relationships (e.g., Shen et al. 2008; Morgan et al. 2010). On the opposite side of the vicinity of the optical spectral window, B absolute magnitudes sit at the top of the blue-bump emission enhancement, which is crucial for the well known blue excess that distinguishes quasars from the stellar population. The I and B apparent magnitudes are readily available for the LQAC-3 sources from the DSS and SDSS photometric measurements, and the corresponding absolute magnitudes are presented.

According to Hogg et al. (2000), in the case of an homogeneous and isotropic cosmological model with a Friemann-Lemaître-Robertson-Walker metrics and a null space curvature, the expression of the luminosity distance $D_{\rm L}$ of a quasar with redshift z is given by

$$D_{\rm L} = \frac{(1+z)c}{H_0}\int_1^{1+z}\frac{{\rm d}u}{\sqrt{\frac{1}{3}(1-2q_0)+\frac{2}{3}(1+q_0)u^3}} \quad (2)$$

where c is the speed of light, H_0 the *Hubble* expansion factor, and q_0 a deceleration parameter. The dependence of the luminosity distance $D_{\rm L}$ on the values of q_0 and H_0 was discussed by Souchay et al. (2009). In this paper, the values of the fundamental parameters were $q_0 = -0.58$ and $H_0 = 72\ {\rm km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$, which are consistent with recent cosmological constraints (Komatsu et al. 2011). Here we calculated the luminosity distance using slightly different values for these cosmological constraints. We used $H_0 = 70\ {\rm km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$, $\Omega_{\rm M} = 0.3$, $\Omega_\lambda = 0.7$, and $q_0 = -0.65$.

The galactic reddening is extracted from the $E(B-V)$ extinction maps of Schlegel et al. (1998). The interpolation uses the code from the same authors. The K corrections are those from Richards et al. (2006) for the infrared band, and from Véron-Cetty & Véron (2006) for the blue band. Input values of the apparent magnitudes are from the GSC2.3, the PPMXL, and the DR10Q SDSS catalogs.

Figure 4 shows the distribution of the mean apparent magnitudes per bin of redshift. As a general feature, the higher the redshift, the dimmer the brightness because of the increasing distance. Moreover, for the same source at the same distance, the B magnitudes are larger than the I magnitudes because of atmospheric extinction.

On the other hand, Fig. 5 shows the distribution of the mean absolute magnitudes per bin of redshift z. Up to $z = 5$, the increasing QSO activity is seen, mitigated in the figure by the cosmological correction from luminosity distance to redshift. For

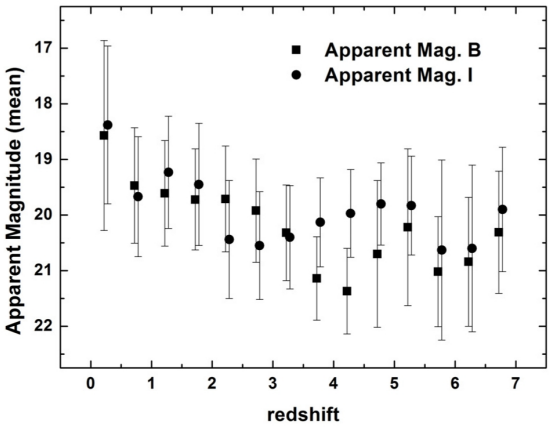

Fig. 4. Distribution of the mean apparent magnitudes per bin of redshift. Symbols are slightly offset but refer to the same redshift bin.

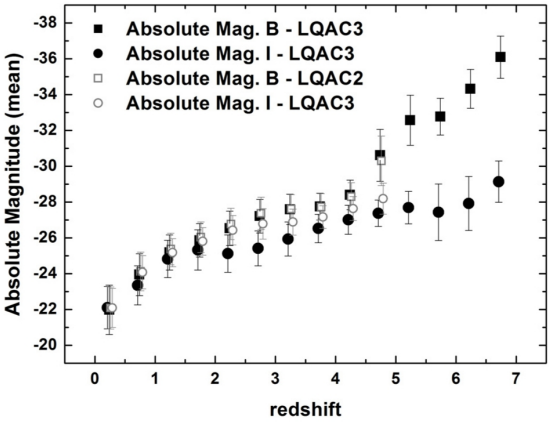

Fig. 5. Distribution of the mean absolute magnitudes per bin of redshift. Only sources for which both B and I absolute magnitudes were determined are considered to the mean. Also shown is the same distribution as for the sources in the earlier version LQAC2 – that is, without the SDSS BOSS sources – and no net variation appears. The interesting asymmetry between the B and I distributions after redshift 5 must be taken with caution owing to the small number of elements in those bins. Symbols are slightly offset but refer to the same redshift bin.

$z > 5$, the bins are underpopulated. Thus the distribution asymmetry might be due to specific objects, as well as to the lack of consideration to the Lyman-α attenuation.

The inclusion of the Lyman-α forest effects and a more complete form of the fundamental transformation stated in Eq. (1) have recently been pointed out and reviewed by Andrei et al. (2014) and Coelho et al. (2014), which propose a new approach for calculating the absolute magnitudes (Coelho et al., in prep.). This new approach is planned for the next issues of the LQAC.

6. Determination of morphological indexes

The aspects of morphology and astrometric variability were crucial for selecting the quasars to form the successive versions of the ICRF, which were based on radio VLBI observations, as for the last one, the ICRF2 (Ma et al. 2009). Also in the optical band, these two aspects are increasingly addressed in programs of high astrometric precision. For the *Gaia* mission, the morphological indexes used here were included in the *Gaia* Initial QSO Catalog (GIQC, Andrei et al. 2012).

In radio waves bright spots are commonly formed where shocks traveling up the jets exchange energy with the external medium (Begelman et al. 1984) and are often taken as the radio centroid. In contrast to this, light emitted in (and around) the optical window originates mostly in the very central quasar, either by thermic processes in the accretion disk or relativistic processes at the basis of the jets. But, as the original quasi-stellar like-object term reveals, light can also originate in the host galaxy and, though comparatively less, in emission lines and as a consequence of the heating of more distant surrounding dust.

The study of what interaction exists between quasars and their host galaxies is central to establishing the difference to more quiescent galaxies and to investigating the host stellar population and formation rate (Cai et al. 2014). The morphology of the host galaxy is thus important for understanding the spectral energy distribution (SED), out of the discrete radio flux, spectroscopic, and photometric measurements presented in the catalog. However a large difficulty in studying it comes from the hundred or a thousand times stronger light emission from the AGN itself.

A lot of effort has therefore been put into disentangling the central source and the galaxy isophotes by suitable modeling. This was indeed proposed in the formulation of the GIQC and is implemented for all quasars observations in the *Gaia* mission (Ducourant et al. 2014). At the same time, a single point spread function (PSF) fitting can be analyzed to characterize the extent of the influence of the host galaxy on the compound image, which is crucial for astrometric purposes, as well as to decide how much is to be gained or lost from a complicated modeling of the centroid.

The approach of analyzing the PSF of the quasar image in comparison with the local mean PSF of stars of similar magnitude is the same adopted in the former versions of the LQAC. The elements of comparison are the parameters SHARP, SROUND, and GROUND, determined by IRAF's DAOFIND on the Johnston B, R, and I digitized plates of the DSS. The morphological indexes of each quasar are given by

$$M_{\rm PC} = \mid P_{\rm Q} - \overline{P_{\rm s}} \mid / \sigma s \qquad (3)$$

where $M_{\rm PC}$ is the morphological index of quasar Q for the PSF parameter P in color C, given in comparison to the mean value from the stars s, and normalized by the stellar standard deviation σ.

There are 146 398 new sources with morphological indexes determined. Adding to the ones from the previous LQAC-2 version, there are in total 291 903 quasars for which the morphological indexes were calculated. As in the previous version, concerning the new determinations, we can observe that although we have a large majority of stellar-like objects, there is a significant proportion of quasars for which the PSF is disturbed by the otherwise not easily detectable host. Moreover, still as in the LQAC-2, we can note in Figs. 6 and 7 that the more the host becomes conspicuous, the more the observational wavelength shifts from B to I.

For each of the newly determined 146 398 objects, at least one good image exists, that is to say that at least one morphological index could be obtained. At last the whole set of nine morphological indexes could be determined for 59% of the entries.

The direct comparison with the same morphological indexes for the stars provides a sanity check to verify zero averages and standard deviations at about 0.9 for SHARP, 0.7 for SROUND, and 0.8 for GROUND, which are slightly smaller at I than B,

A&A 583, A75 (2015)

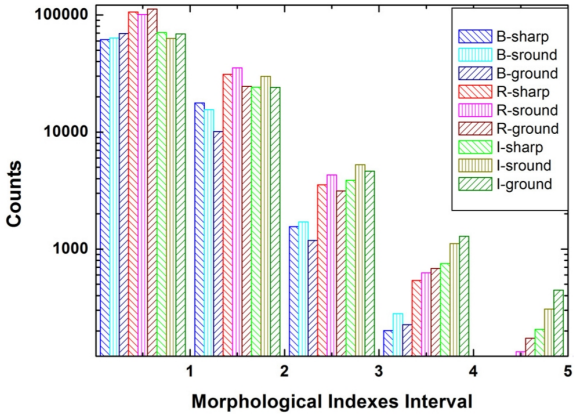

Fig. 6. Histogram of the morphological indexes for the quasars already belonging in the LQAC-2. The source count is on a log10 basis. Letters *B*, *R*, and *I* refer to the three colors of DSS plates: blue, red, and infrared. The mnemonics after the letters refer to the IRAF's DAOFIND sharp, sround, and ground.

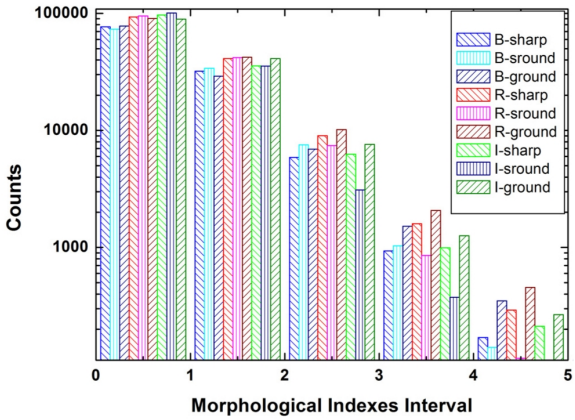

Fig. 7. Histogram of the morphological indexes for the new quasars in the LQAC3. The source count is on a log10 basis. Letters *B*, *R*, and *I* refer to the three colors of the DSS plates: blue, red, and infrared. The mnemonics after the letters refer to the IRAF's DAOFIND sharp, sround, and ground.

but without statistically significant magnitude evolution between magnitudes $R = [9, 22]$. DAOFIND has been largely and successfully used, for instance, for detecting clusters (Bastian et al. 2011). The way to circumvent its performance degradation in low illumination regimes is to use a logical training process (Mahonen & Hakala 1995). This is done here by using the nearby, similar magnitude stars. Figure 8 shows the averages of the morphological indexes for the *B*, *R*, and *I* plates, showing that although the underlying physical processes are quite complex, the general trend is coherent.

The main features of the morphological indexes for the new sources in the LQAC-3 are the same as in the former versions. However, the populations from which the sources are drawn present differences. We have already mentioned that the quasars newly included in the LQAC-3 come from the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (SDSS-III: BOSS, Ross et al. 2013). In contrast to the two former issues of the SDSS, where magnitudes peaked around 18 and the redshift range peaked around 1, the SDSS.III/BOSS was designed to target quasars in the redshift range $z = [2.2, 3.5]$. This is a very relevant stretch of

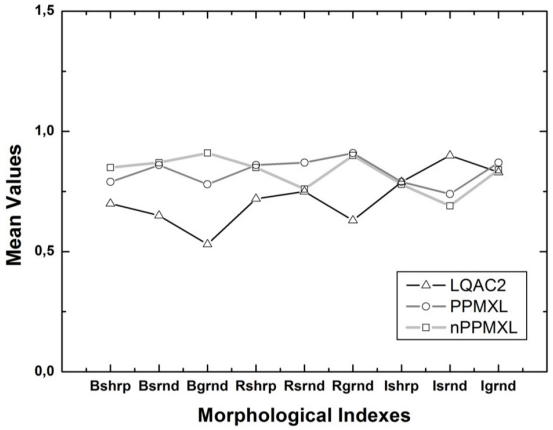

Fig. 8. Mean values of the morphological indexes. (Because of the large number of elements, the standard error's bar is invisible in this scale.) The line with triangles refers to the quasars already present in the LQAC-2. The line with circles refers to the new quasars in the LQAC-3 that also are found in the PPMXL catalog. Correspondingly, the line with squares refers to the new LQAC3 quasars not found in the PPMXL. The new LQAC3 population is trimmed brighter than $R = 19$.

the quasar luminosity function, when the quasar number density and luminosity were at their maximum. At the same time, the quasar luminosity function is such that increasing redshift is counterbalanced by increasing luminosity, leading to the dimming of apparent magnitudes being very attenuated. As the energy is fed back from the active nuclei to the host galaxy, the latter often presents as a massive elliptical type with large quantities of dust and a high rate of star formation, compatible with both infrared and UV emission. But its direct imaging is unlikely to be detected because of cosmological dimming of the surface brightness. In the BOSS description, the incompleteness due to the absence of quasars for which the galaxy emerges is said to be smaller than 3% in a regime brighter than magnitude $r = 21$ (Ross et al. 2013). The SDSS photometric classifier that uses the amount of light within growing rings around the brighter central spot is well suited to selecting compact targets for spectroscopic measurements.

To maximize the certainty of the morphological indexes for the new, more distant sources included in the LQAC-3, we took three more conservative steps. We calculated the source count and convolve them with the Mahonen & Hakala (1995) distribution what downsizes the indexes. We restricted the analysis to only sources brighter than $R = 19$. We searched matches in the PPMXL catalog, limiting the candidates to those that are close in distance and in magnitude and that have a negligible proper motion. There are 65% more quasars found in the PPMXL than not (slightly less for the *B* plates), and the PPMXL sources are on average 0.85 *R* magnitude brighter. By comparing the PPMXL and non-PPMXL found quasars, however, the correlation over all plates and morphological indexes is 99.9%, thus clearly implying that the images on the DSS plates were found correctly and that the training of the morphological indexes made the magnitude effects unimportant. Finally we proceeded to examine the distribution indexes with respect to the redshift, shown in Fig. 9. As expected, stellar-like close-to-zero values are found, increasing from *B* to *I*. Much less obviously, within each color the averages of the morphological indexes remain nearly constant, which would favor a scenario of coevolution of galaxies and supermassive black holes (Heckman & Best 2014).

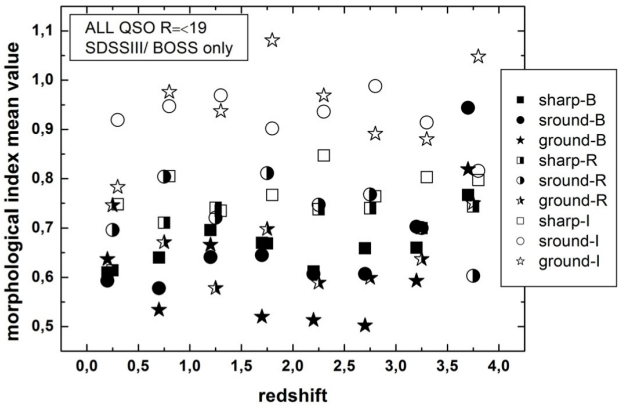

Fig. 9. Distribution of the morphological indexes with respect to the redshift. To avoid any contamination due brightness and distance, only sources with $R < 19$ enter into the averages. Moreover, to avoid contamination from different selection criteria, the sources were selected just from the SDSS list. The color code is dark symbols for *B*, half colored symbols for *R*, and clear symbols for *I*. Symbols are slightly offset but refer to the same redshift bin. *B* morphological indexes are offset to the left, and *I* morphological indexes are offset to the right.

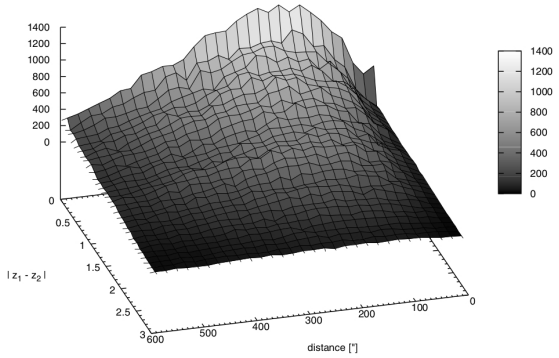

Fig. 10. 2D histogram showing the total number of quasars pairs in the LQAC-3 catalog with respect to their angular distance ρ and their redshift difference Δz. Bin intervals are 20″ for ρ and 0.1 for Δz.

7. Double quasars, coincident quasars, and false pairs

Quasar pairs do not systematically characterize objects that are physically linked together. In fact we can distinguish three kinds of pairs of quasars for which it looks necessary to adopt a well-defined terminology. Thus we call "binary quasars" objects that are true physical associations. By contrast, we call "coincident" quasars two objects that have no physical link but whose lines of sights are very close. In addition we must consider "false pairs" consisting of the same quasar as has been recorded by two different catalogs with close coordinates. This last case supposes that for at least one of the two catalogs, the coordinates' offsets are larger than the radius used for our cross-identifications, typically 2″, which means that its astrometric quality is highly questionable. A fourth category of quasar pairs can also be mentioned: the gravitationally lensed quasars, where the first example was discovered by Walsh et al. (1979) and whose a sample of 88 objects has been listed by Véron-Cetty & Véron (2010).

A related study carried out during the construction of the first release of the LQAC (Souchay et al. 2009) has shown that the risk of finding false pairs is obviously zero for objects involving VLBI radio surveys, such as the ICRF (flag A), the VLBA(B), the VLA(C), and the JVAS(D) with milliarcsecond or sub-milliarcsecond accuracy. This risk is still basically zero for the SDSS(E), the 2dF(F), the 2dF-SDSS LRG(G) with subarcsecond accuracy. In contrast, the risk of a false pair is not negligible when the identification for one of the two quasars concerned has been done with the FIRST(H) or the Hewitt and Burbridge(I) surveys, as well as with some small catalogs compiled by Véron-Cetty & Véron (2010), which have shown some coordinate uncertainty at the level of 1 arcsec.

Gathering quasars from different surveys in the same catalog as the LQAC-3 constitutes a good opportunity to search for pairs of quasars. Their nature and distribution can have some cosmological implications, as shown by Hennawi et al. (2006), who present a detailed study of quasar pairs conducted from the SDSS and 2dF QSO redshift survey. They find a sample of 221 new pairs with proper transverse separations smaller than a threshold of 1 h^{-1} Mpc over the redhift range of $0.5 < z < 3.0$. In particular, they noticed a small-scale excess of double quasars, which can probably be attributed to dissipative interaction events.

A specific study of quasar pairs, in particular intended to classify them in one of the three categories above (binary quasars, coincident quasars, false pairs), was done by Gattano et al. (2014) starting from the 188 504 objects of the LQAC-2 release, both by using real images of the objects, when available, and by taking their redshifts into account. For instance, a significant difference in redshift value clearly supports the presence of a pair of coincident quasars, which in some cases is firmly confirmed by two neighboring objects in the field at the predicted position. In contrast, close values of redshifts with a small angular separation favor the two other cases, i.e. a false pair or a binary quasar. A visual check may clearly determine which case should be retained.

Such a study is scheduled in the scope of an ongoing paper devoted to detecting quasar pairs and to confirming their status as double quasars, coincident quasars, or false pairs, starting from the large LQAC-3 sample. Nevertheless, as a first approach we show in Fig. 10 the 2D histogramm of the number of quasars pairs found in each bidimensional bin $(\Delta z, \rho)$ where Δz is the redshift difference and ρ is the angular distance between the two components. Figure 11 represents the same histogram but by keeping only the pairs of quasars both belonging to the dominant SDSS survey, whereas in Fig. 12 we show only the pairs for which at least one of the components does not belong to the SDSS.

The three histograms show that for any angular distance ρ, the largest number of quasar pairs is obtained for the first bin $0 < \Delta z < 0.1$. For the overall sample (Fig. 10), this number peaks at 1 381 pairs for $180'' < \rho < 200''$. For the exclusive SDSS pairs (Fig. 11), the peak is 1149 for the same interval in ρ, whereas for the pairs involving at least a non SDSS object (Fig. 12), we can observe two peaks: one at 335 pairs for the lowest bin value $0'' < \rho < 20''$, and another one at 320 pairs for $120'' < \rho < 140''$. The definite presence of the first peak is doubtful: it should be explained by a dominant number of false pairs resulting from the fact that at least one of the components comes from a catalog with poor astrometric performance. This will be investigated in the forthcoming paper mentioned above.

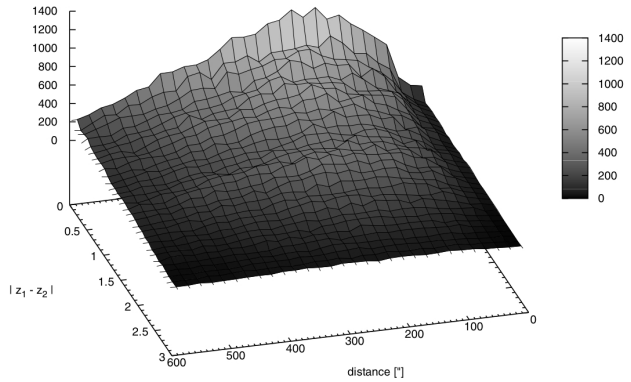

Fig. 11. 2D histogram showing the total number of SDSS quasars pairs in the LQAC-3 catalog with respect to their angular distance ρ and their redshift difference Δz. Bin intervals are 20" for ρ and 0.1 for Δz.

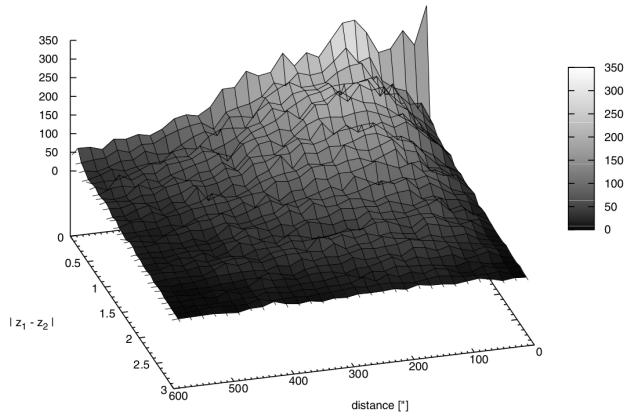

Fig. 12. 2D histogram showing the number quasars pairs with at least one non SDSS component in the LQAC-3 catalog with respect to their angular distance ρ and their redshift difference Δz. Bin intervals are 20″ for ρ and 0.1 for Δz.

8. Presentation of the LQAC-3

The LQAC-3 gathers a total of 321 957 objects. For a very large part, they include quasars but with a small proportion of active galaxies and BL Lac objects, already present in the last Véron-Cetty & Véron (2010) compilation.

8.1. Data and format

In the following we present the items of the LQAC-3 in a sequential order according to each column.

– Column 1 gives the LQAC number of the object. This number was constructed starting from boxes defined from intervals in degrees both in right ascension and in declination. For instance, the quasar named LQAC_313 − 034_002 is the second one included in the box corresponding to intervals $313° < \alpha < 314°$ and $-35° < \delta < -34°$. For objects already present in the LQAC-2 release, the number remains unchanged. Moreover, some SDSS quasars present in the LQAC-2 compilation were no longer present in the LQAC-3 one. In that case, for the sake of coherence, their number has not been utilized again to name a new quasar in the same box.
– Column 2 gives the original name of the quasar. For objects already present in the catalog of quasars and active nuclei by Véron-Cetty & Véron (2010), we use the same terminology. This column was not present in the LQAC and LQAC-2 catalogs.
– Column 3 gives a flag that indicates the attribution of the nature of the object: "QSO" for quasars fully reckoned optically, "AGN" for AGN's, "BLA" for "BLAC", and "RAD" for point-like objects concerned principally with radio VLBI emissions (catalogs A, B, C, D), which are those for which we have no optical counterpart in our compilation.
– Columns 4 and 5 are the equatorial coordinates (α, δ) of the object given by the original catalog.
– Columns 6 and 7 are the equatorial coordinates (α, δ) of the object in the ICRF according to the astrometric algorithms described in Sect. 4. These coordinates are supposed to be more exact than the original ones except for the quasars present in the radio VLBI catalogs (flags A, B, C, D).
– Columns 8 to 20 provide letter codes to indicate the presence of the quasar in one of the 13 catalogs from A to M as given by the nomenclature in Table 1, the flag "E" representing the SDSS. All information related to these catalogs is given by Souchay et al. (2012).
– Column 21 gives the redshift as determined from the original catalog generally indicated in Col. 2.
– Columns 22 to 28 are the visual magnitudes listed by increasing value of the wavelength. The photometric bands are the u, b, v, g, r, i, z, respectively. The photometric system in which the magnitude has been measured is not homogeneous for each band. The priority is indicated by the first flag starting from the first optical catalog, the SDSS, with flag E. For instance, the value of the r magnitude of a quasar observed both by the SDSS (flag E) and the 2QZ (flag F) is taken from the SDSS, whereas the value of the b magnitude, only present in the 2QZ, will be taken from this survey.
– Columns 29 and 30 present the J and K infrared magnitudes for 21 844 quasars for which we have found a counterpart in the 2MASS survey.
– Columns 31 to 35 give the radio fluxes at 1.4 GHz (20 cm), 2.3 GHz (13 cm), 5.0 GHz (6 cm), 8.4 GHz (3.6 cm), and 24 GHz (1.2 cm), respectively, when available. These radio fluxes concern exclusively the quasars coming from the four first catalogs (flags A to D), those coming from VLBI sessions.
– Columns 36 to 44 provide us with the morphological indexes where the determination has been explained in full detail in Sect. 5.4. They concern the B (Cols. 35 to 37), R (Cols. 38 to 40), and I (Cols. 41 to 43) bands with three indexes each, the first one characterizing the skewness, the second one the roundness, and the last the normality.

References

Aihara, H., Prieto, C. A., An, D., et al. 2011, ApJS, 193, 1
Andrei, A. H., Souchay, J., Zacharias, N., et al. 2009, A&A, 505, 385
Andrei, A. H., Anton, S., Barache, C., et al. 2012, in SF2A-2012: Proc. Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, 61
Andrei, A. H., Coelho, B., & Antón, S. 2014, in Journées Systèmes de Référence Spatio-Temporels, St. Petersburg meeting
Bastian, N., Adamo, A., Gieles, M., et al. 2011, MNRAS, 417, L6
Begelman, M. C., Blandford, R. D., & Rees, M. J. 1984, Rev. Mod. Phys., 56, 255
Bolton, A. S., Schlegel, D. J., Aubourg, E., et al. 2012, AJ, 144, 144
Cai, Z., Fan, X., Noterdaeme, P., et al. 2014, ApJ, 739, 139
Coelho, B., Andrei, A. H., & Antón, S. 2014, EGSG Workshop, Meudon, Dec. 8–10

Ducourant, C., Krone-Martins, A., Galluccio, L., & Teixeira, R. 2014, in SF2A-2014: Proc. Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, 421
Gattano, C., Souchay, J., & Barache, C. 2014, A&A, 564, A117
Komatsu, E., Smith, K. M., Dunkley, J., et al. 2011, ApJS, 912, 18
Heckman, T. M., & Best, P. N. 2014, ARA&A, 52, 589
Hennawi, J. F., Strauss, M. A., Oguri, M., et al. 2006, AJ, 131, 1
Hogg, D. W. 2000, ArXiv e-prints [arXiv:astro-ph/9905116]
Lasker, B. M., Lattanzi, M. G., Mc. Lean, B. J., et al. 2008, AJ, 136, 735
Ma, C., Arias, E. F., Bianco, G., et al. 2009, IERS Technical Note, 35, 1
Mahonen, P. H., & Hakala, P. J. 1995, ApJ, 452, L77
Morgan, C. W., Kochanek, C. S., Morgan, N. D., & Falco, E. E. 2010, ApJ, 712, 1129
Monet, D. G., Levine, S. E. C. B., Ables, H. D., et al. 2003, AJ, 125, 984
Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, E., et al. 2012, A&A, 548, A66
Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, E., et al. 2014, A&A, 563, A54
Richards, G. T., Lacy, M., Storrie-Lombardi, L. J., et al. 2006, AJ, 131, 2766
Ross, N. P., McGreer, I. D., White, M., et al. 2013, ApJ, 773, 14
Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, ApJ, 500, 525
Schneider, D. P, Richards, G. T., Hall, P. B., et al. 2010, AJ, 139, 2360
Shen, Y., Greene, J. E., Strauss, M. A., Richards, G. T., & Schneider, D. P. 2008, ApJ, 680, 169
Souchay, J., Andrei, A. H., Barache, C., et al. 2009, A&A, 494, 815
Souchay, J., Andrei, A. H., Barache, C., et al. 2012, A&A, 537, A99
Véron-Cetty, M. P., & Véron, P. 1984, A&A, ESO Scientific Report, No. 1
Véron-Cetty, M. P., & Véron, P. 2006, A&A, 455, 773
Véron-Cetty, M. P., & Véron, P. 2010, A&A, 518, A10
Walsh, N. E., Carswell, R. F., & Weymann, R. J. 1979, Nature, 279, 381
Zacharias, N., Urban, S. E., Zacharias, M. I., et al. 2004, AJ, 127, 3043

Apêndice B

Artigo Submetido à revista *A&A* (recomendado para publicação após alterações)

Astronomy & Astrophysics manuscript no. bcoelho
September 8, 2016
©ESO 2016

A new approach to obtain absolute magnitudes of QSOs.

B. Coelho[1], A. H. Andrei[1,2,3] and S. Antón[4]

[1] Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ladeira Pedro Antônio 43, Saúde, Rio de Janeiro-RJ, CEP 20080-090, Brazil
e-mail: bcoelho@astro.ufrj.br
[2] Observatório Nacional/MCTI, Rua José Cristino 77, São Cristóvão, Rio de Janeiro-RJ, CEP 20921-400, Brazil
[3] Observatoire de Paris – SYRTE, CNRS/UMR 8630 & Université Pierre et Marie Curie, 75005 Paris, France
[4] Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa , PT1749-016 Lisbon, Portugal

Received September 15, 1996; accepted March 16, 1997

ABSTRACT

Context. There are different physical processes contributing for the SEDs of QSOs at the optical domain, like spectral lines and blue bump continuum emission, and in general the SED models have been considering them. The situation is nevertheless more complex, as processes like Lyman alpha forest and host galaxy dust absorption may partially hamper the QSOs output, and therefore should be taken in to account. This impacts significantly for a good estimate of the absolute magnitudes of the objects.
Aims. We present a new approach – intended to be more complete – to calculate the absolute magnitudes of QSOs, taking into account the contribution of emission lines and blue bump. On top of that we also apply corrections to Lyman alpha forest and host galaxies dust absorption.
Methods. We demonstrate the method by calculating absolute magnitudes, in different bands, for the QSOs of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS-DR7), using the Gaia library of synthetic spectra, and considering different combinations of spectral indexes and emission lines strength.
Results. Comparisons with other methods show that the terms newly included can lead to absolute magnitudes typically brighter by an addend of 2. The statistical comparison of the SEDs computed here to the SDSS observed ones verifies the method through the apparent magnitudes to the level of 0.06 mag in the *i* band.

Key words. word1 – word2 – word3

1. Introduction

Quasi-stellar objects (QSOs) are powerful and distant objects with an active galactic nucleus (AGN), in the sense that the enormous quantity of energy released from the very small central region cannot be explained by stellar emission. In the accepted paradigm, that amount of energy is most likely due to the presence of a super massive black hole (SMBH), that is accreting matter (see for eg. review in Urry & Padovani, 1995). In its vicinity, broad emission lines might escape from a region known as broad emission line region. Narrow emission lines are also detected in AGNs, the emission taking place in regions that are tens of parsec distant from the nuclear region. A torus of dust and gas surrounding the central engine may explain the fact that some AGNs exhibit both broad and narrow emission lines (Type I) whereas others only exhibit narrow emission lines (Type II), as a consequence of the orientation of the system torus-central engine with the observer's line of sight. In ∼ 10% of the AGNs, material moving at relativistic velocities is ejected from the central region, in the form of a collimated jet. Type II QSOs are difficult to detect (Reyes et al. 2008) because the brightest regions are veiled, thus the majority of QSOs known are Type I (Schneider et al. 2010; Pâris et al. 2012), objects for which we are in position to detect the emission from both the accretion disk and broad emission line region components.

The emission from QSOs can range from the radio to the gamma-ray regimes. While these two extreme wavelength regimes are well described by power laws, in order to describe the rest-frame QSO's optical emission, it is necessary not only a non-thermal component described by a simple power law, but also a thermal component (blue-bump, maybe associated with the accretion disk emission), and the emission lines component (see for eg. Malkan & Sargent, 1982).

The absolute magnitude gives a measure of the intrinsic luminosity in a given bandpass, it is therefore a crucial quantity: fundamental to study the QSOs luminosity function (eg. Richards et al. 2006; Ross et al. 2013), and for the study of QSO-host relations (eg. Shen et al. 2008; Letawe et al. 2010; Rosario et al. 2013), among others.

We describe in this paper a new method to compute absolute magnitudes of QSOs, that might constitute a better approach than the recipes usually adopted in literature. In Sect. 2, we present a summary of the existent methods to calculate magnitudes, and then present the method proposed here, also by highlighting the differences between the different approaches. In Sect. 3 we describe the library of synthetic spectra, used to model the QSOs SEDs. In Sects. 4 and 5 we explain how we corrected the magnitudes for intergalactic, and host galaxy extinctions. In Sect. 6 we show how we obtained absolute magnitudes using a library of synthetic spectra. Throughout this paper we use a flat cosmology with $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ and $H_0 = 70$ km s^{-1} Mpc^{-1}. The luminosity distances were determined according to Hogg (2000).

A&A proofs: manuscript no. bcoelho

2. The absolute magnitudes

Traditionally the absolute magnitude M in a given bandwidth can be calculated trough the equation:

$$M = m + 5 - 5\log D_L - A - K, \quad (1)$$

where m is the apparent magnitude, D_L is the luminosity distance in pc, A represents the Galactic extinction and K, the so called K-correction (Oke & Sandage, 1968). Due to the redshift effects on the portion of the SED sampled by a given filter, caused by the expansion of the Universe, it is necessary to apply the K-correction to transform the observed magnitude to an effective rest-frame bandpass. This k-correction depends on the filter, and the object's redshift and the type of SED. The main difference between our approach and the ones usually adopted in literature, is exactly the way we deal with the QSO's SED.

Vanden Berk et al. (2001) calculate absolute magnitudes using a simple power-law continuum ($f_\lambda \propto \lambda^\alpha$), with $\alpha = -1.56$. Richards et al. (2006) made use of a similar simple power-law ($f_\nu \propto \nu^\alpha$) with $\alpha = -0.5$ as approximation for the continuum, but they also provided additional corrections for the i SDSS band to remove the contribution of the emission lines.

The k-correction proposed by Wisotzki (2000) takes into account both the continuum features and the lines. The continuum is estimated by a cubic spline interpolation of the emission features of 25 (low redshift) QSOs, based on narrow band data, in line-free emission bands. The emission lines are accounted for by following Francis et al. (1991), valid for objects at $z < 2.2$ (so not affected by the Lyman alpha forest).

Some works assume a mixed approach: Véron-Cetty & Véron (2010), use a power-law $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ ($\alpha = 0.3$) for the continuum and emission lines correction similar to Wisotzki (2000), also including a correction to account for the Lyα forest dimming which is dependent of the redshift. Souchay et al. (2012) made use of the k-corrections provided by Richards et al. (2006), and the ones (to include emission lines) given by Véron-Cetty & Véron (2010).

Our approach is the following:

- We consider two more components to the Eq.1,
  - one relative to the extinction of UV photons in the intergalactic medium that is going to be described in Sect. 4.
  - another relative to the reddening caused by the dust in the QSO's host galaxy that is going to be described in Sect. 5.
- We obtain the absolute magnitudes directly from the QSO's SED instead of using a discreet set of mean k-corrections.
- We use SED models that take into account a continuum with blue bump, plus emission lines, with the advantage, relative to the works cited above, that we are considering different spectral indexes and different emission lines strengths.

To demonstrate our method, we made use of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) quasar catalog by Schneider et al. (2010) relative to the SDSS seventh data release (DR7; Abazajian et al. 2009). It has 105783 Type I QSOs spectroscopically confirmed, with all objects selected to have absolute magnitude[1] $M_i < -22.0$, to have at least one emission line with FWHM larger than 1000 km s^{-1} or complex absorption features, apparent magnitude $i \gtrsim 15$ and have highly reliable redshifts. The QSOs in the catalog have redshifts between $z = 0.065$ and $z = 5.464$, covering ≈ 9380 deg^2 of the sky. The catalog provides, along other information, redshifts, and *BEST PSF* apparent magnitudes in the five SDSS bands *ugriz* (Fukugita et al. 1996), that are going to be used in our absolute magnitudes calculations. The contamination by broad absorption line quasars in this catalog is small, less then 6% according to Shen et al. (2011), so we will not consider any special treatment to this kind of objects.

We started by correcting the SDSS *ugriz* apparent magnitudes for the Galactic extinction based on the maps of Schlegel et al. (1998). We also applied the corrections for the AB offsets[2] ($u_{AB} = u_{SDSS} - 0.04$ and $z_{AB} = z_{SDSS} + 0.02$) so, from now on we will be referring to magnitudes in the AB system (Oke & Gunn, 1983).

3. Gaia library of synthetic spectra

A key aspect in the calculation of absolute magnitudes that we are describing in this work is the library of SEDs at the QSOs's rest-frame. We used the QSO-reg set for $z = 0$ publicly available in the Gaia library of synthetic spectra[3] and described in Claeskens et al. (2006). These spectra were obtained with a modified template technique. First a composite spectrum was built based on averaged observations, then an analytical continuum was subtracted, resulting in a spectrum with just emission lines $E(\lambda)$. This emission-line spectrum is then multiplied by a factor β and added to the analytical continuum[4] $C(\lambda, \alpha)$, resulting in a final spectrum that can by described as:

$$I(\lambda) \propto [C(\lambda, \alpha) + \beta(W)E(\lambda)]. \quad (2)$$

The continuum used by Claeskens et al. (2006) is:

$$C(\lambda, \alpha) \propto \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-\alpha} \exp\left(\frac{-\lambda_1}{\lambda}\right) \exp\left(\frac{-\lambda}{\lambda_2}\right) + 0.021\right], \quad (3)$$

where $\lambda_0 = 10500$ Å, $\lambda_1 = 240$ Å, and $\lambda_2 = 1250$ Å. The first of the three terms λ dependent, that are multiplied by each other, is a simple power-law with spectral index α. The other two terms allow to extend the wavelength range of the adjusted continuum, making the model of Claeskens et al. (2006) a better approach to the total continuum emitted by a QSO.

The QSO-reg set contains 315 different spectra for $z = 0$, with the spectral index α varying from -4.0 to 3.0 by a step of 0.5, and for each value of α are given 21 different emission lines intensities. Claeskens et al. (2006) identifies the spectra by the value of the spectral index α and by a quantity W that is related to the factor β, and basically represents the total equivalent width of all emission lines. So, the greater the value of W the greater the intensity of the emission lines. The analytical continuum, that models better a larger portion of the SED, together with the full range of different spectral indexes, combined with the possibility to have different intensities for the emission lines, will allow to model much better the real SED of the different QSOs than the use of a simple power law with a single spectral index.

The 315 model spectra, that we used in this work, cover the wavelengths between 2500.5 Å and 10499.5 Å, with a 0.5 Å sampling, and the values of $I(\lambda)$ are provided in arbitrary units. So, it is necessary to choose which spectra models better each QSO of the sample, apart the need to scale each spectrum. To do

[1] Calculated assuming a simple power-law ($f_\nu \propto \nu^\alpha$), with $\alpha = -0.5$, and without taking into account the emission lines.

[2] https://www.sdss3.org/dr8/algorithms/fluxcal.php#SDSStoAB

[3] http://www.sc.eso.org/~asmette/gaia/

[4] The spectral index α of this continuum is not necessarily the same of the continuum used in the subtraction to obtain $E(\lambda)$.

that we use the apparent magnitudes, see Sect. 6, first corrected for extinction and reddening effects, that are discussed in Sects. 4 and 5.

4. Lyman alpha forest corrections.

The Lyman alpha (Lyα) forest consists on a series of absorption lines, that can be observed on the spectra of distant QSOs in wavelengths shorter than the QSO's Lyα emission line. These absorption lines are mostly Lyα (1215.67 Å) resonance lines in different redshifts (Lynds, 1971), produced when the QSO's light passes through intergalactic clouds of neutral hydrogen (see Rauch, 1998 and references therein). Additional contributions of intervening metals and Helium are small (Madau, 1995).

In the case of SDSS, the redshifted Lyα emission line is observed in the *u* band for objects with $z \gtrsim 2.2$. Thus, the flux from QSOs with $z > 2.2$ may have been partially absorbed by intervenient inter-galactic material, the band most affected depending on the object's redshift, so it is necessary an evaluation of the impact of the Lyα forest on the apparent magnitudes, in order to best estimate the intrinsic flux.

Meiksin (2006) obtained corrections to the magnitudes of high-redshift objects (starburst galaxies, Type I and Type II QSOs) due to intergalactic attenuation, via improved modeling of the inter-galactic attenuation, that includes more realistic properties of the intervening material and higher order Lyman transitions (Meiksin & White, 2004), obtaining a better agreement with the observation (eg. Inoue et al. 2014).

We extracted the values of the corrections for SDSS *ugriz* bands from the Type I QSO curves of Meiksin (2006). Apparent magnitudes corrected for the Ly_α forest absorption are obtained subtracting the Meiksin (2006) corrections from the apparent magnitudes (previously corrected for the Galactic extinction, see Sect. 2). We did not apply the Meiksin (2006) correction to *z* magnitudes because they are only affected by the Ly_α forest when $z > 5.5$, and the QSO with highest redshift in our sample has $z = 5.461$.

5. Intrinsic dust corrections.

Hopkins et al. (2004) based on a sample of 9566 quasars, $z < 2.2$, from SDSS DR1 catalog (Schneider et al. 2003), showed that the "red tail" of the color distribution of quasars may be explained by dust reddening. Richards et al. (2003) had previously interpreted the red tail as due to dust located at the redshift of the quasar, and for that reason Hopkins et al. (2004) assumed the modal color as being a measure of the intrinsic color of the quasars (statistically the modal value is less sensitive to the presence of an asymmetric tail than the mean value). After fitting five-band photometry normalized by the modal color as function of redshift – with Small Magellanic Cloud (SMG), Milky Way, Large Magellanic Cloud (LMC) and Gaskell et al. (2004) extinction laws – they concluded that the SMG law gives the best description for the reddening caused by dust at the quasar redshift.

Hopkins et al. (2004) considered only quasars with redshift $z < 2.2$, because for higher redshifts the SDSS photometry is affected by the Ly_α forest absorption. In our case, after applying the Meiksin (2006) corrections to overcome that issue, it is possible to check if the reddening follows the same behavior for $z > 2.2$. For the objects with $z < 2.2$ we kept the modal values given by Hopkins et al. (2004).

In order to test if our proposed extension of the Hopkins et al. (2004) model to redshifts z>2.2 is valid, we performed a Monte Carlo analysis of the intrinsic-observed colors, to investigate if there is any correlation with z. The procedure was the following:

- each of the relative colors($u - g$, $g - r$, $r - i$, $i - z$) were divided into 3 groups in terms of z range: first group (control) corresponds to 0.05 – 1.15, second group (comparison) to 1.15 – 2.25, third group (test) to 2.25 – 3.35.
- each group was subdivided in 22 elements corresponding to bins of 0.05 in redshift.
- to each group a Monte Carlo algorithm is applied by taking 100000 times the average of 11 elements drawn from the 22 possible. Bootstrapping is allowed, so that a same element can eventually contribute repeatedly withing any given average.
- the trial consists to compare how the comparison and test groups fare against the control group. The outcome comes from the average of 100000 comparisons, although it converges rapidly, so that the outcome from 1000 comparisons is closely the same.

The average differences, in the sense (test-control)-(comparison-control) are as follows: $\langle u-g\rangle = -0.0053 \pm 0.0315$; $\langle g - r\rangle = 0.0137 \pm 0.0071$; $\langle r - i\rangle = 0.0073 \pm 0.0046$; $\langle i - z\rangle = 0.0181 \pm 0.0066$. On views of such differences, at the order or lesser than 0.01mag, it can be concluded that the relative colors behave the same bellow and above of the redshift of 2.2.

For $z > 3.4$ the determination of the modal value is not well constrained due to the small number of objects per bin, see Fig.1, the differences between the mode and the mean are of the order of σ, so for those objects we adopt the mean as a measure of the intrinsic color. For redshifts z>5 there are very few QSOs in the sample so the adopted mean is that for the 4.95<z≤5 range.

The statistics above suggests that the fundamentals for Hopkins et al. (2004) approach should continue valid at those larger redshifts. We note that some works propose different extinction laws for high redshift objects (eg. Maiolino et al. 2004, Gallerani et al. 2010) but recently Krawczyk et al. (2015), based on a large sample of ∼ 35000 QSOs, with z up to 5.3, found that overall the SMC extinction law is the best one, and our tests are in agreement with that.

The reddening due to dust varies from region to region, in this work we considered the SMC "bar", also used by Hopkins et al. (2004). To obtain the extinction $A(\lambda)$ we use the curve in Gordon et al. (2003), which gives $A(\lambda)/A(V)$ as function of $1/\lambda$. Their data points reveal a strong linear correlation over a wavelength range between 1160Å and 21980Å, the best fit given by:

$$A(\lambda)/A(V) = 8200.477(1/\lambda) - 0.577, \quad (4)$$

with a correlation coefficient $r > 0.99$. We made an extrapolation down to $\lambda = 1091$Å, using Eq.4 to obtain $A(\lambda)$ associated to the *u* band up to $z > 2.25$. To extract the value of $A(V)$, we assumed the mean value for the SMC bar, $R_V = 2.74$ from Gordon et al. (2003), and the relation $R_V = A_V/E(B - V)$ (Cardelli et al. 1989). The objects, that are redder than the mode, will have different values of $E(B - V)$ (Hopkins et al., 2004). We made the value of $E(B - V)$ vary from 0 to 0.8 by a step of 0.05, obtaining a full range of different values for $A(V)$, and for each value a different curve $A(\lambda)$. The difference between the intrinsic color and the observed one is then matched with the difference of $A(\lambda_{central}/(1 + z))$ associated with the filters involved in the given color, being $\lambda_{central}$ the central wavelength

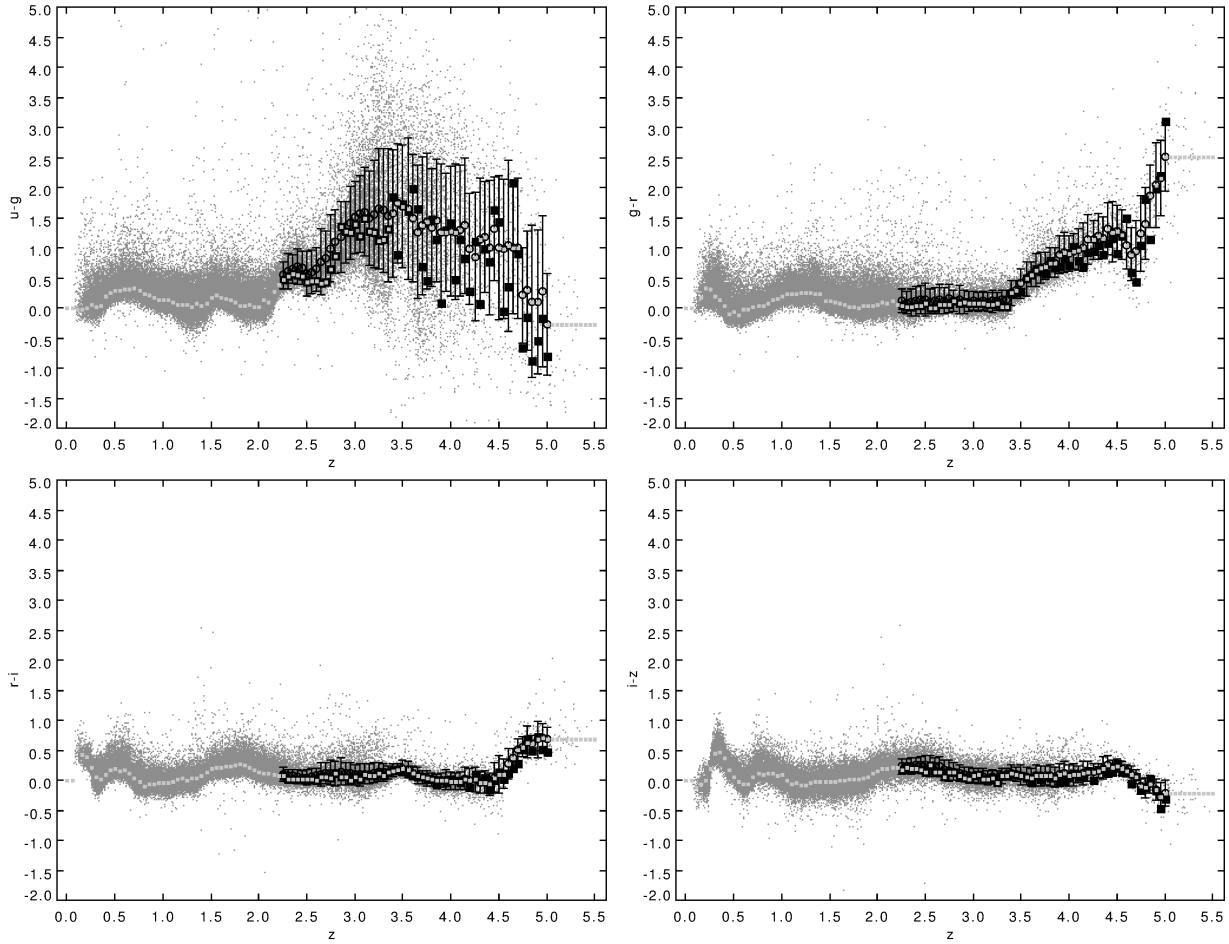

Fig. 1. Observed colors corrected for Galactic extinction, and Ly$_\alpha$ forest, as function of redshift (gray dots). The empty circles represent the mean color, the black squares the modal color, and the error bars the standard deviation per redshift bin of 0.05. Intrinsic colors are in light gray squares, for $z < 2.2$ they correspond to the modal values of Hopkins et al. (2004). Top left – $(u-g)$, top right – $(g-r)$, bottom left – $(r-i)$ and bottom right – $(i-z)$.

of a filter (Gunn et al. 1998), in order to choose the best values/curve of extinction for each QSO. As Richards et al. (2003) and Hopkins et al. (2004), we found that for the majority of the objects $E(B-V) \leq 0.05$. Finally, we subtracted the value of $A(\lambda_{central}/(1+z))$ obtained, to correct the apparent magnitudes from the extinction due to any putative dusty region that might exist in the QSO host.

6. Calculating absolute magnitudes.

The apparent magnitudes in a given filter corrected for Galactic, intergalactic, and QSO's host galaxy extinctions are then used to compute absolute magnitudes M^*. This can be translated as:

$$M^* = m + 5 - 5\log D_L - A - A_{IG} - A_{host}. \quad (5)$$

Notice that this Eq. 5 differs from Eq. 1, because it has the two additional extragalactic extinction terms, and there is no K-correction. Because of the k-correction absence, M^* refers to a bandwidth bluer and narrower than the corresponding filter's bandwidth in $z = 0$.

To transform the magnitudes M^* into absolute magnitudes in the SDSS filters's rest-frame bandwidth, it is necessary to know the SED of the QSO, it is here that we used the spectral library (see Sect. 3). Remember that the spectra of the library are not scaled, but that is not necessary to compute colors. So for each spectra in the library we obtained the colors (u^*-i^*, g^*-i^*, r^*-i^*, and i^*-z^*), notice that these colors involve a transformation of the filters bandpasses to compensate the redshift effect ($\lambda_{emit} = \lambda_{obs}/(1+z)$).

For each QSO of our sample we choose a spectrum from the library to model its SED, using the least squares method to minimize the difference between the colors (u^*-i^*, g^*-i^*, r^*-i^*, and i^*-z^*) and the colors ($M^*_u - M^*_i$, $M^*_g - M^*_i$, $M^*_r - M^*_i$, and $M^*_i - M^*_z$).

After choosing the spectrum that gives the best model for the SED shape of a given object, we give real units to it multiplying it by a factor N, so $f_\nu = N \times f'_\nu$, being f_ν a flux density at 10 pc in erg s^{-1} cm^{-2} Hz^{-1}. The multiplying factor N_{filter} was obtained, for each filter, from the AB system equation (Oke & Gunn, 1983):

$$N_{filter} = 10^{(M^*_{filter}+48.6)/(-2.5)-\log f'_\nu}, \quad (6)$$

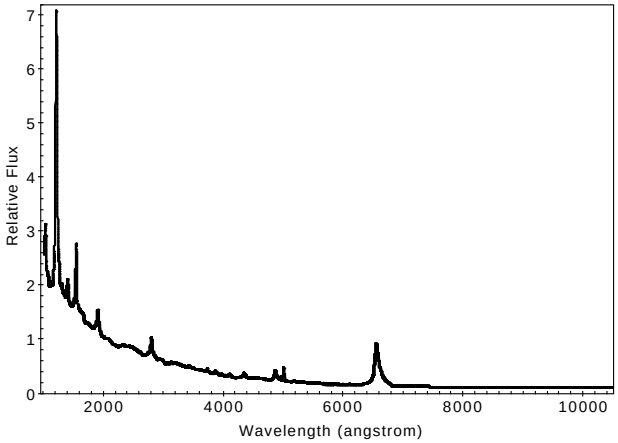

Fig. 2. Template used for $z \gtrsim 1.27$, made with Gaia's synthetic spectrum ($\alpha = 0.0$, $W = 6309.5$) extended to the UV till $\lambda = 1017.9$Å using SWIRE QSO1 template.

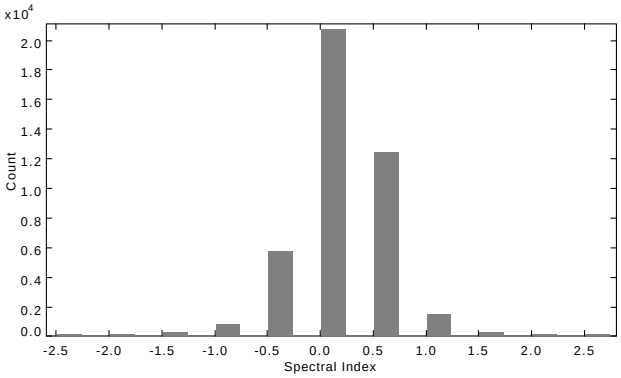

Fig. 3. Distribution of the spectral index, representing the objects up to $z \sim 1.27$.

and the final N value was obtained averaging the values of N_{filter}.

Finally, after the synthetic spectrum scaling, one can use the spectrum to obtain the final absolute magnitude M_{filter} in any filter with bandpass within the wavelength range.

Due to the $\lambda = 2500.5$Å limit of synthetic spectra, only i and z bands can be used to choose and calibrate the synthetic spectra of objects with $z > 1.27$. So for $z \lesssim 1.27$ we use the Gaia synthetic library, while for the objects with redshift $z \gtrsim 1.27$ we used one single SED template, instead of choosing a spectrum from the Gaia library.

To make the template we got the QSO Type I (QSO1) template from the SWIRE[5] Template Library[6] (Polletta et al. 2007). The QSO1[7] template has a coverage from $\lambda = 1017.9$ Å up to $\lambda = 6046$ μm. The extra UV coverage allows one to use the values of u, g and r to redshifts higher than ∼1.27, however the sampling of this template (>18 Å) is much worst than the Gaia synthetic spectra, so we decided to use a Gaia spectrum between $\lambda = 2500.5$Å and $\lambda = 10499.5$Å. We checked that the Gaia synthetic spectrum that gives the best adjust to their spectra is the one with $\alpha = -0.5$ and $W = 6309.5$. The final template made with the Gaia's spectrum plus the extension for $\lambda < 2550.5$Å is shown in Fig. 2.

The extreme values of $|\alpha| > 2.5$ chosen in the SDSS DR7 sample by our algorithm lead to a non realistic distribution of spectral index values. The distribution was reasonably smooth and well behaved with modal value at $\alpha = 0$, but there was a spike $\alpha = -4.0$ that even a bimodal distribution could not explain. We believe this may be caused by the effect that strong emission lines have on the observed colors. For example when these strong emission line features are observed in the i band this results in a blue $i - z$, for a higher redshift the emission is observed in the z band, and suddenly the color $i - z$ becomes red. The spectrum choice will not be reliable in these transition in the colors. This limitation could be overcome by using additional data in infrared (eg. J, H, K magnitudes) or using another spectral library with greater UV coverage. However for this work we will keep using just SDSS magnitudes together with the Gaia library. Accordingly the spectral index range was restricted by removing from the library the values $|\alpha| > 2.5$. The 2.5 value is better suit as the extreme of the range since it corresponds to the minimum value of the main branch of the initial distribution. The final distribution of spectral indexes appears in Fig.3 and it is in good agreement with the values commonly used in literature.

On other hand the values of $W > 1\text{x}10^5$ also led to a non realistic distribution in redshift and magnitude value. This problem was noticed by the presence of spikes in the distributions of absolute magnitudes as function of redshift. Comparisons of the objects in the spikes with others at the same redshift, and with similar apparent magnitudes, also showed us that the extreme values of W were not reasonable. The cause, we believe to be the same of the α issue, described above. So we also limited the range of W values by removing from the library the values $W > 1\text{x}10^5$. Again the limit value ($W = 1\text{x}10^5$) was chosen for being a minimum of the W distribution. In the next section we will comment how this new limits in α and W values made our algorithm to perform well by choosing reasonable models for the generality of the objects in our sample.

7. Results and discussion.

As mentioned in Sect. 3 we applied the method, described throughout this paper, to the QSOs of SDSS-DR7. In this Section we discuss the results obtained for that sample and compare them to other approaches found in literature.

After having a scaled spectrum model for each QSO we can calculate for them the absolute magnitude in any filter for which the bandpass falls inside the spectrum coverage (Sect. 6). We calculated the absolute magnitudes in the 5 SDSS bands. In Fig. 4 the absolute magnitudes M_u, M_g, M_r and M_z are represented against redshift, the results for M_i appear in Fig. 5 together with the M_i values computed according to Richards et al. (2006) and Schneider et al. (2010) for comparison. Around $z \sim 0.7$ and $1.0 \lesssim z \lesssim 1.2$ the M_i and M_z distributions present small features of objects with lower absolute magnitudes. These are related with the selection limits in apparent magnitude i. The redshifts where emission lines features are observed in the i band, make possible the selection of objects with lower continuum levels than in redshifts where just the continuum emission falls into the i band. When one computes the rest frame absolute magnitudes, the i and z bands give continuum emission, so the selection effects appear in these two bands. Notice that the methods where just one simple power law spectrum is used hide this selection

[5] Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Survey (http://swire.ipac.caltech.edu/swire/astronomers.html)
[6] http://www.iasf-milano.inaf.it/~polletta/templates/swire_templates.html
[7] The UV-Optical part of the QSO1 corresponds to a composite SDSS quasar spectrum made by Vanden Berk et al. (2001).

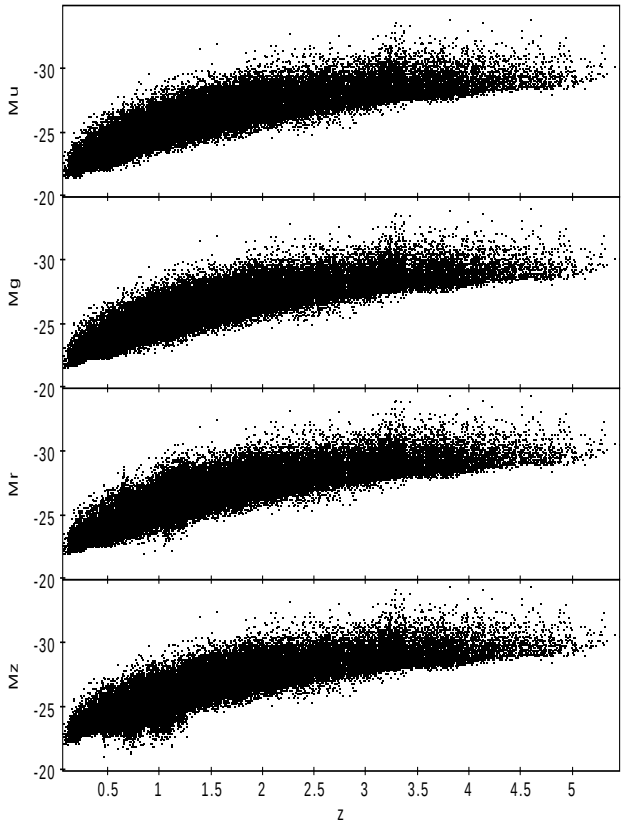

Fig. 4. Absolute magnitudes vs redshift. From top to bottom M_u, M_g, M_r and M_z.

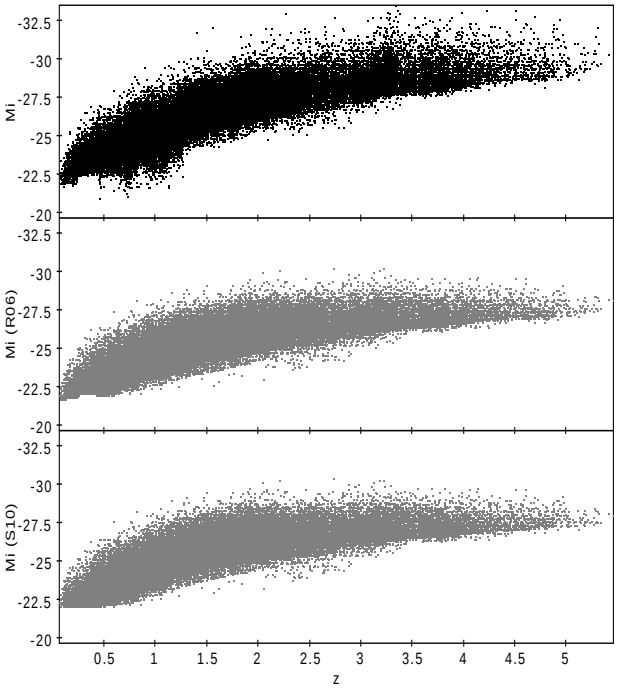

Fig. 5. Absolute magnitude (M_i) vs redshift. Top – This work. Middle – Absolute magnitudes from Richards et al. (2006). Bottom – Absolute magnitudes from Schneider et al. (2010). The use of simple power law hides the selection effects. See text for more details.

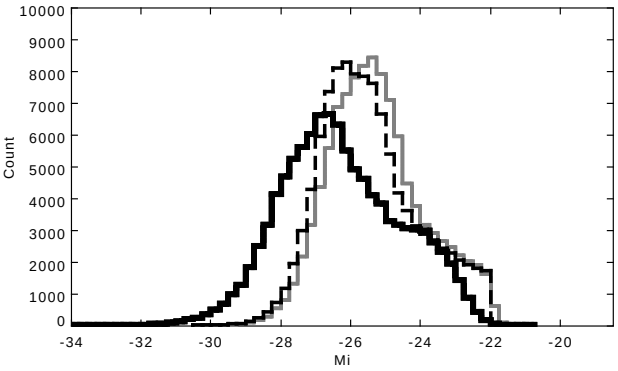

Fig. 6. Thick black line – Distribution of our absolute magnitude M_i. Dashed line – Distribution of Schneider et al. (2010) absolute magnitudes. Thin gray line – The distribution of the absolute magnitudes calculated according to Richards et al. (2006). Our magnitudes are brighter and they have a slightly broader distribution.

effect. The transition from the multiple spectra regime of Gaia's library to the single spectrum SWIRE+Gaia ($z \sim 1.27$) gives smooth absolute magnitude distributions, showing that using a single spectrum provides in this case a good overall approximation. Again, the inputs of this approach are not unique, one could extend the usage of the Gaia library to higher redshifts using redder magnitudes (eg. J, H and K), or other library with greater UV coverage can be adopted.

Fig. 6 shows a histogram of absolute magnitude M_i where our results are compared to the ones obtained according to Richards et al. (2006) and Schneider et al. (2010). Our M_i is on average 1.32 mag brighter than the one according to Richards et al. (2006) and 1.06 mag brighter than the one of Schneider et al. (2010). Our M_i σ is slightly larger, 1.15 compared to 0.93 and 0.85 respectively.

The differences between M_i computed in this work and the ones of the two references mentioned above are shown as function of redshift in Fig.7. It is visible that in both cases the differences increase with redshift. This is due to the fact that the simple power law neglects emission in wavelengths redder than H_β (see Vanden Berk et al. 2001), and with the increase of the distance between the observed bandpass and the filters rest frame wavelengths the amount of flux neglected becomes larger.

Finally we tested the chosen SED models used to calculate the absolute magnitudes of the SDSS-DR7 QSOs by checking how well they reproduce the SDSS observed spectra. For that we randomly selected $\sim$ 1000 objects over 5 redshift bins, see Fig.8. In same figure we show the median of the difference between the models and the observed SDSS spectra for each redshift bin. The differences are in general close to zero, and it is also noticeable that the worst adjustment is obtained for low redshift, and improved for greater redshifts. About this aspect we would like to highlight that the comparison is being made for observed flux density which have greater values for lower redshifts, normalizing the differences to the median flux density of the bin will attenuate the differences between the median differences obtained for the different redshift bins. However the poorer quality of the adjustment in lower redshifts is real and can be on one hand explained by the greater detail in the observed spectra that makes more difficult to adjust all the spectral features, and on other hand we might end choosing W to big in lower red-

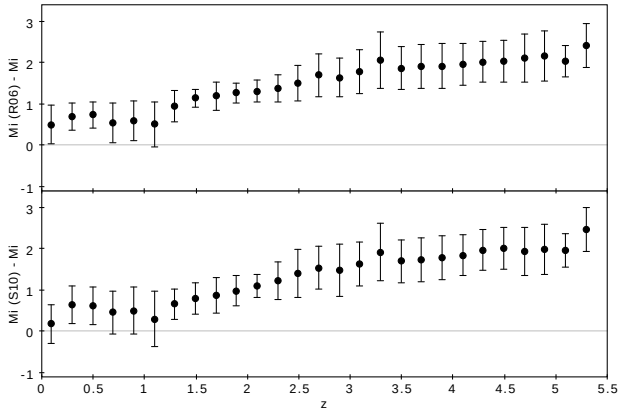

Fig. 7. In this figure are represented the mean differences per redshift bin of 0.2, as function of redshift. Top – M_i according to (Richards et al. 2006) minus M_i of this work. Bottom – M_i (Schneider et al. 2010) minus M_i of this work. Is visible a increase of the difference with redshift for both cases. The error bars represent 1σ of the differences inside the bin.

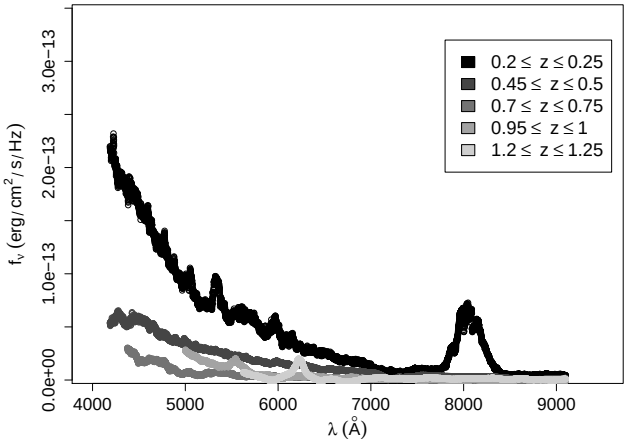

Fig. 8. Median values -in terms of flux density (f_ν) as function of wavelength (λ)- of the differences between models and SDSS observed spectra, for ∼ 1000 objects randomly distributed over 5 redshift bins.

shifts. As already mentioned in this paper we detected objects for which the W parameter was to high, our solution for that issue uses the average W obtained up to a given redshift, so due to statistical effect the choice of W may improve with redshift. In terms of magnitudes the median differences are: 0.40 mag for g band, 0.11 mag for r and 0.06 mag for i (see Table 1), which represents $\sim$ 2 – 0.3% of the average apparent magnitudes. In the case of i band the value is of the same order than the SDSS apparent magnitude errors. This suggests that Gaia library models are in fact a good approximation to the SED of SDSS-DR7 QSOs.

		g	r	i
overall	Δ_{median}	0.40	0.11	0.06
$0.20 \leq z \leq 0.25$	Δ_{median}	0.50	0.31	0.21
$0.45 \leq z \leq 0.50$	Δ_{median}	0.33	0.29	0.10
$0.70 \leq z \leq 0.75$	Δ_{median}	—	0.06	0.01
$0.95 \leq z \leq 1.00$	Δ_{median}	—	0.06	0.01
$1.20 \leq z \leq 1.25$	Δ_{median}	—	0.09	0.06

Table 1. Median values for the differences between apparent magnitudes obtained from the models and the ones obtained from the SDSS observed spectra.

8. Conclusion

We presented a new way to calculate the absolute magnitudes of QSOs that takes in consideration the Ly_α forest absorption and both extinctions, the Galactic and the one from host galaxy. After correcting for the Ly_α forest, we showed that SMC dust like hypothesis is reasonable for redshifts higher than 2.2. In the point of view of the SED, our approach allows to consider different spectral indexes and different intensities for the emission lines. This translate in a more complete approach compared with previous ones used in the literature. We showed that our magnitudes tend to be brighter (up to 2 mag) than the ones available in SDSS catalogs. We also highlight some aspects that resulted from our work:

– we noticed that the SDSS-DR7 catalog selected some objects with weaker continuum when strong emission features are observed in i band.
– the higher values of W above 10^5 and the extreme values of spectral index $|\alpha| > 2.5$ available in the Gaia library of synthetic spectra do not adjust well the SED of the QSOs from the SDSS-DR7 catalog.
– extra care is needed in choosing the SED model for QSOs when strong emission line features are at play.
– the SMC extinction law seems to be a reasonable good proxy to correct the extinction effects due to dust that might exist in the QSO host.

Acknowledgements. BC thanks CAPES PhD grant. AHA thanks CNPq grant #306379/2013 – 9. Funding for the SDSS and SDSS-II has been provided by the Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, the National Science Foundation, the U.S. Department of Energy, the National Aeronautics and Space Administration, the Japanese Monbukagakusho, the Max Planck Society, and the Higher Education Funding Council for England. The SDSS Web Site is http://www.sdss.org/. The SDSS is managed by the Astrophysical Research Consortium for the Participating Institutions. The Participating Institutions are the American Museum of Natural History, Astrophysical Institute Potsdam, University of Basel, University of Cambridge, Case Western Reserve University, University of Chicago, Drexel University, Fermilab, the Institute for Advanced Study, the Japan Participation Group, Johns Hopkins University, the Joint Institute for Nuclear Astrophysics, the Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, the Korean Scientist Group, the Chinese Academy of Sciences (LAMOST), Los Alamos National Laboratory, the Max-Planck-Institute for Astronomy (MPIA), the Max- Planck-Institute for Astrophysics (MPA), New Mexico State University, Ohio State University, University of Pittsburgh, University of Portsmouth, Princeton University, the United States Naval Observatory, and the University of Washington.

References

Abazajian, K., et al. 2003, AJ, 126, 2081 (DR1)
Abazajian, K., et al. 2009, ApJS, 182, 543 (DR7)
Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, ApJ, 345, 245
Claeskens, J.-F., et al. 2006, MNRAS, 367, 879
Francis, J. P., et al. 1991, ApJ, 373, 465
Fukugita, M., et al. 1996, AJ, 111, 1748
Gallerani, S., et al. 2010, A&A, 523, 85
Gaskell, C. M., et al. 2004, ApJ, 616, 147
Gordon, K. D., et al. 2003, ApJ, 594, 279
Gunn, J. E., et al. 1998, AJ, 116, 3040
Hogg, D. W. 2000, arXiv:astro-ph/9905116v4
Hopkins, P., et al. 2004, AJ, 128, 1112
Inoue, A., et al. 2014, MNRAS, 442, 1805
Krawczyk, C., et al. 2015, AJ, 149, 203
Lequeux, J., et al. 1982, A&A, 113, 15
Letawe, Y. 2010, MNRAS, 403, 2086
Lynds, R. 1971, ApJ, 164, 73

Madau P., 1995, ApJ, 441, 18
Maiolino, R., et al. 2004, Nature, 431, 533
Malkan, M. A., & Sargent, W. L. W. 1982, ApJ, 254, 22
Meiksin A., & White M., 2004, MNRAS, 350, 1107
Meiksin, A. 2006, MNRAS, 365, 807
Pâris, I., et al. 2012, A&A, 548, 66
Polletta et al. 2007, ApJ, 663, 81
Prévot, M. L., et al. 1984, A&A, 132, 389
Oke, J. B., & Sandage, A. 1968, ApJ, 154, 21
Oke, J. B., & Gunn, J. E. 1983, ApJ, 266, 713
Rauch, M. 1998, ARAA, 36, 267
Reyes, R., et al. 2008, AJ, 136, 2373
Richards, G. T., et al. 2003, AJ, 126, 1131
Richards, G. T., et al. 2006, AJ, 131, 2766
Rosario, D. J., et al. 2013, A&A, 560, 72
Ross, N., et al. 2013, ApJ, 773, 14
Schlegel, D. J., et al. 1998, ApJ, 500, 525
Schneider, D. P., et al. 2003, AJ, 126, 2579
Schneider, D. P., et al. 2010, AJ, 139, 2360
Shen, Y. et al. 2008, ApJ, 680, 169
Shen, Y. et al. 2011, ApJS, 194, 45
Souchay, J., et al. 2012, A&A, 537, 99
Urry, M. & Padovani, P. 1995, PASP, 107, 803
Vanden Berk, D. E., et al. 2001, AJ, 122, 549
Vanden Berk, D. E., et al. 2001, AJ, 122, 549
Véron-Cetty, M.-P., & Véron, P. 2010, A&A, 518, 10
Wisotzki, L. 2000, A&A, 353, 861