



Observatório
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

O ELO PERDIDO NA EVOLUÇÃO DE RÁDIO-GALÁXIAS: INVESTIGANDO
EMISSÕES ESTENDIDAS EM BAIXA FREQUÊNCIA

VINÍCIUS SANCHES MOREIRA LIMA

RIO DE JANEIRO
2025

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Observatório Nacional
Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

O ELO PERDIDO NA EVOLUÇÃO DE RÁDIO-GALÁXIAS: INVESTIGANDO
EMISSÕES ESTENDIDAS EM BAIXA FREQUÊNCIA

por

Vinícius Sanches Moreira Lima

Dissertação submetida ao Corpo Docente do
Programa de Pós-graduação em Astronomia
do Observatório Nacional, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Grau
de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Alberto Rodríguez Ardila

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Outubro de 2025

L732

Lima, Vinícius Sanches Moreira

O Elo Perdido na Evolução de Rádio-Galáxias: Investigando Emissões Estendidas em Baixa Frequência [Rio de Janeiro] 2025.

xii, 104 p. 29,7 cm:

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2025.

1. Núcleos Ativos de Galáxias. 2. Radiogaláxias. 3. Jatos.
4. Radiação Síncrotron. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“O ELO PERDIDO NA EVOLUÇÃO DE RÁDIO-GALÁXIAS: INVESTIGANDO
EMISSIONES ESTENDIDAS EM BAIXA FREQUÊNCIA”

VINÍCIUS SANCHES MOREIRA LIMA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dr. Alberto Rodríguez Ardila – Observatório Nacional
(Orientador)

Dr. Anderson Caproni – Universidade Cidade de São
Paulo

Dr. Rogério Monteiro Oliveira – Observatório Nacional

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
8 DE OUTUBRO DE 2025

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de diferentes formas, contribuíram para a realização deste trabalho. Reconheço que muitas pessoas prestaram ajuda valiosa e embora seja impossível nomear individualmente cada uma delas, gostaria de registrar com carinho alguns agradecimentos especiais.

Aos servidores do Observatório Nacional, que me receberam de braços abertos desde o início do mestrado, em especial à Giane e a Chris, sempre solícitas e prontas a nos auxiliar nas solicitações administrativas. Aos amigos do Observatório e do grupo de pesquisa em AGNs, pelas discussões estimulantes, pela colaboração e pelo ambiente de troca que foram fundamentais para o desenvolvimento do conhecimento construído ao longo dos anos.

À minha família, à Ana Beatriz e aos demais amigos fora da área acadêmica, agradeço pelo incentivo contínuo, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo apoio incondicional que me deram forças para seguir adiante.

Agradeço de maneira especial ao meu orientador, Prof. Dr. Alberto Rodríguez Ardila, cuja paciência, generosidade intelectual e constante orientação ao longo dos anos foram decisivas para a condução e amadurecimento deste trabalho. Sou profundamente grato por todo o conhecimento compartilhado.

Deixo também meu profundo agradecimento à Dra. Raffaella Morganti, que propôs este trabalho inicialmente como uma colaboração e o acompanhou durante sua expansão, resultando nesta dissertação de mestrado. Agradeço pela orientação, pelos ensinamentos e pela disponibilidade em guiar este projeto.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro que possibilitou a execução deste trabalho. A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta dissertação: muito obrigado.

“The beauty of a living thing is not the atoms that go into it, but the way those atoms are put together.”

Carl Sagan

O ELO PERDIDO NA EVOLUÇÃO DE RÁDIO-GALÁXIAS: INVESTIGANDO
EMISSÕES ESTENDIDAS EM BAIXA FREQUÊNCIA

RESUMO

Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs) com jatos são classificados morfologicamente de acordo com seu estágio evolutivo, sendo as fontes de Espectro com Pico em Gigahertz (GPS) e Espectro Íngreme Compacto (CSS) tradicionalmente entendidas como representantes da fase jovem e confinada dos jatos. No entanto, o paradigma de uma evolução linear tem sido desafiado por uma abundância de fontes compactas e pela descoberta de objetos que apresentam um núcleo jovem embutido dentro de uma estrutura referente a uma emissão estendida e envelhecida, indicando episódios múltiplos de atividade (jatos “reiniciados”). Este trabalho visa reavaliar uma amostra de 84 fontes previamente classificadas como GPS/CSS, utilizando a sensibilidade incomparável do levantamento *LoTSS* (LOFAR Two-metre Sky Survey) em 144 MHz para detectar emissão estendida de baixo brilho superficial, indetectável em levantamentos com frequência superior a 1 GHz. Combinamos dados multifrequência (de 144 MHz a 4.85 GHz) para realizar uma análise morfológica comparativa e construir Distribuições Espectrais de Energia (SEDs). Nossos resultados mostram que 9 fontes (17.3%) apresentam evidências morfológicas claras de emissão extensa, sendo classificadas como reiniciadas. Outras 9 fontes (17.3%) são classificadas como candidatas a fontes reiniciadas, e 28 (53.8%) permanecem como compactas. A análise espectral revela uma diversidade de classes (GPS, CSS, HFP e espectros sem pico ou achatados em baixa frequência), com uma tendência de que fontes com reinício tendem a ter espectros mais íngremes (CSS). Concluímos que uma fração significativa das fontes compactas são, na verdade, fontes reiniciadas, sugerindo que a atividade dos jatos é um processo cíclico e intermitente. Este resultado tem implicações profundas para os modelos evolutivos de radiogaláxias e para a compreensão do *feedback* galáctico exercido por múltiplos episódios de atividade.

THE MISSING LINK IN RADIO GALAXY EVOLUTION: INVESTIGATING
EXTENDED LOW-FREQUENCY EMISSIONS

ABSTRACT

Active galactic nuclei (AGNs) with jets are morphologically classified according to their evolutionary stage, with Gigahertz Peaked-Spectrum (GPS) and Compact Steep-Spectrum (CSS) sources traditionally understood as representing the young and confined phase of jets. However, the paradigm of a linear evolution has been challenged by an abundance of compact sources and the discovery of objects featuring a young nucleus embedded within a structure related to extended and aged emission, indicating multiple episodes of activity (“restarted” jets). This work aims to re-evaluate a sample of 84 sources previously classified as GPS/CSS by leveraging the unparalleled sensitivity of the LOFAR Two-metre Sky Survey (LoTSS) at 144 MHz to detect extended, low-surface-brightness emission undetectable in surveys above 1 GHz. We combined multi-frequency data (from 144 MHz to 4.85 GHz) to perform a comparative morphological analysis and construct Spectral Energy Distributions (SEDs). Our results show that 9 sources (17.3%) display clear morphological evidence of extended emission, being classified as restarted. Another 9 sources (17.3%) are classified as restarted jet candidates, and 28 (53.8%) remain compact. Spectral analysis reveals a diversity of classes (GPS, CSS, HFP, and spectra without peaks or flattened at low frequencies), with a tendency for restarted sources to have steeper (CSS-like) spectra. We conclude that a significant fraction of compact sources are, in fact, restarted jets, suggesting that jet activity is a cyclic and intermittent process. This result has profound implications for evolutionary models of radio galaxies and for the understanding of feedback exerted by multiple episodes of activity.

Lista de Figuras

1.1	Exemplos espectrais característicos de galáxias.	3
1.2	Exemplos de radiogaláxias com morfologias distintas	7
1.3	Esquema do ciclo de vida das radiogaláxias	11
2.1	Ilustração do efeito do preenchimento do plano uv com um <i>array</i> composto por 27 antenas.	15
2.2	Núcleo do LOFAR (Superterp)	18
2.3	Estações remotas do LOFAR no território holandês	19
2.4	Rede internacional de estações LOFAR na Europa	19
2.5	Exemplo de campo profundo do LOFAR (Lockman Hole)	20
2.6	Montagem de fontes estendidas detectadas pelo LoTSS	21
2.7	Cobertura e sensibilidade aproximada do LoTSS	23
3.1	Exemplo da interface gráfica <i>imview</i> do CASA	33
3.2	Exemplos de fontes estendidas	38
3.3	Comparação ilustrativa de duas distribuições espectrais de energia.	40
4.1	Imagens LoTSS a 144 MHz das 9 fontes estendidas.	46
4.2	SED da região nuclear das 9 fontes estendidas.	49
4.3	Imagens <i>FIRST</i> a 1.4 GHz	52
4.4	Fontes compactas	55
4.5	Fontes indeterminadas	57
4.6	Fonte 46 (2MASXJ1530)	58
4.7	Imagens <i>FIRST</i> a 1.4 GHz	60
B.1	Todas as imagens LoTSS da amostra	78
C.1	Todas as imagens <i>FIRST</i> da amostra	88
D.1	Todas as SEDs da amostra	97

Lista de Tabelas

2.1	Principais parâmetros dos levantamentos rádio	28
3.1	Descrição da amostra.	30
4.1	Classificação espectral das fontes analisadas.	41
4.2	Contagem morfológica da amostra.	61
4.3	Classificação espectral da amostra.	61
A.1	Tabela completa de fluxos da amostra	76

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Núcleos Ativos de Galáxias	1
1.2	Classificação e características dos AGNs	2
1.2.1	Galáxias Seyfert	2
1.2.2	Quasares	4
1.2.3	Blazares	5
1.2.4	Radiogaláxias	6
1.3	Jatos Relativísticos	7
1.3.1	Radiação Síncrotron	8
1.4	Fontes de Rádio Compactas: Paradigma Evolutivo	9
1.4.1	Atividade Intermitente dos Jatos	9
1.5	Objetivos	11
2	Radioastronomia e Levantamentos	13
2.1	Radioastronomia e Instrumentação	13
2.1.1	Princípio da interferometria e síntese de abertura	13
2.1.2	Telescópios, arquiteturas e levantamentos	16
2.1.3	Parâmetros observacionais relevantes	16
2.2	Levantamentos	17
2.2.1	O radiotelescópio LOFAR: arquitetura e imagens representativas	18
2.2.2	Levantamento LoTSS DR2	21
2.2.3	Levantamento 7C	23
2.2.4	Levantamento WENSS	24
2.2.5	Levantamento Texas	24
2.2.6	Levantamento FIRST	25
2.2.7	Levantamento NVSS	26
2.2.8	Levantamento VLASS	26
2.2.9	Levantamento GB6	27
2.2.10	Considerações de calibração e limitações	27
3	Metodologia	29
3.1	Seleção da Amostra	29

3.2	Common Astronomy Software Applications	32
3.3	Processamento de Imagens e Extração de Fluxo	33
3.3.1	Aquisição e tratamento de dados	33
3.3.2	Medição do ruído de fundo	34
3.3.3	Fotometria de componentes compactas	34
3.3.4	Análise morfológica e fotometria de estruturas extensas	35
3.3.5	Automação e controle de qualidade	36
3.4	Classificação Morfológica e Critérios para Identificação de Emissão Estendida	36
3.5	Construção e Análise das Distribuições Espectrais de Energia	39
4	Resultados e Discussões	41
4.1	Características Espectrais	41
4.2	Análise Espectral e Morfológica das Radiogaláxias	44
4.2.1	Imagens <i>LoTSS</i>	44
4.2.2	Distribuição espectral de energia das fontes estendidas	47
4.2.3	Imagens <i>FIRST</i> das fontes estendidas	50
4.3	Fontes Compactas	54
4.4	Fontes Indeterminadas	55
4.5	Candidatas a Fontes Reiniciadas	58
4.6	Discussão Geral e Resumo Estatístico da Amostra	60
5	Considerações Finais	63
5.1	Resumo e conclusões	63
5.2	Implicações científicas	64
5.3	Limitações do estudo	64
5.4	Recomendações e trabalhos futuros	65
5.5	Considerações finais	66
	Referências Bibliográficas	67
A	Tabela de Fluxos	75
A.1	Tabela de Fluxos	75
B	Imagens LoTSS das 52 fontes utilizadas neste trabalho	78
B.1	Imagens LoTSS	78
C	Imagens FIRST com contornos LoTSS	88
C.1	Imagens FIRST + LoTSS	88
D	SED das 52 fontes estudadas neste trabalho	97
D.1	Distribuição Espectral de Energia (SEDs)	97

Capítulo 1

Introdução

1.1 Núcleos Ativos de Galáxias

Na região central da grande maioria das galáxias reside um buraco negro supermassivo (SMBH, do inglês *supermassive black hole*), com massas que variam de milhões a bilhões de massas solares (Sargent *et al.*, 1978). Quando estes objetos capturam matéria que está em seu entorno, liberam enormes quantidades de energia, dando origem aos Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs, do inglês *active galactic nuclei*). Estes fenômenos estão entre os mais energéticos do universo com luminosidades bolométricas da ordem de $\sim 10^{43}$ – 10^{48} erg s⁻¹, podendo ofuscar a luminosidade integrada de todas as estrelas de sua galáxia hospedeira e, por diferentes processos, emitem radiação em todas as faixas do espectro eletromagnético (Netzer, 2015; Peterson, 1997). A diversidade observacional dos AGNs levou à sua classificação em várias categorias, como os quasares, extremamente luminosos e distantes; as galáxias Seyfert, de luminosidade moderada e residentes em galáxias espirais; os blazares, caracterizados por sua alta variabilidade e emissão dominada por jatos relativísticos apontados quase diretamente para a linha de visada; e as radiogaláxias, tipicamente hospedadas por galáxias elípticas gigantes e notáveis por suas estruturas de grande escala em emissão de rádio (Blandford *et al.*, 2018). Estes objetos apresentam nos seus espectros um contínuo não estelar, produzido por componentes nucleares como o disco de acreção do SMBH, jatos, linhas de emissão e absorção formadas por gás ionizado ao redor da região central da galáxia hospedeira. A compreensão desses sistemas é fundamental para desvendar como a atividade nuclear influencia a evolução das galáxias ao longo do tempo através de mecanismos de retroalimentação (*feedback*). Este fenômeno ocorre quando a energia e o momento liberados pelo AGN são transferidos para o meio interestelar e halo galáctico. É conhecido como *feedback* negativo quando essa injeção de energia no meio exerce a supressão da formação estelar, ao ejetar ou aquecer o reservatório gás. O *feedback* é positivo, quando favorece a formação estelar ao comprimir nuvens gasosas e desencadear instabilidades gravitacionais. O modo cinético opera através da ação direta de jatos e

ventos poderosos, que varrem e dispersam o gás. O modo radiativo opera principalmente através de ventos e escoamentos de gás (*outflows*) gerados no disco de acreção. A energia e o momento transportados por esses fluxos acoplam-se ao meio circumnuclear e ao meio interestelar, conduzindo ao aquecimento e à remoção do gás. Quando esse acoplamento é eficiente, o gás é deslocado ou expelido do potencial gravitacional local, o que impede o resfriamento e o colapso das nuvens responsáveis pela formação estelar. A interação complexa entre esses mecanismos é crucial para autorregular o crescimento do buraco negro e da própria galáxia (Fabian, 2012). Evidências observacionais, como a correlação entre a massa do SMBH e a dispersão de velocidades do bojo da galáxia hospedeira (relação $M-\sigma$), e a detecção de ventos moleculares e ionizados em grande escala impulsionados por AGNs, sugerem que o *feedback* é fundamental para autorregular o crescimento do buraco negro e da galáxia, moldando as propriedades das galáxias que observamos hoje (Zubovas & King, 2019).

1.2 Classificação e características dos AGNs

A notável diversidade fenomenológica dos AGNs, brevemente apresentada na seção anterior, deu origem a um sistema de classificação baseado em suas propriedades observacionais. Este esquema leva em conta características espectroscópicas (como a largura e intensidade das linhas de emissão), propriedades morfológicas (estrutura espacial da emissão em diferentes bandas), luminosidade e variabilidade. Embora esta taxonomia possa sugerir a existência de classes fundamentalmente distintas de objetos, essa diversidade é simplificada através do *Modelo Unificado de AGNs*, que atribui muitas das diferenças observacionais principalmente ao ângulo de inclinação da estrutura nuclear em relação à linha de visada do observador e à presença ou ausência de obscuração por um toróide de poeira. Nas subseções a seguir, detalhamos as principais classes de AGNs.

1.2.1 Galáxias Seyfert

As galáxias Seyfert constituem uma classe de AGNs residentes tipicamente em galáxias espirais, cuja principal característica é um núcleo extremamente brilhante e pontual, frequentemente ofuscando o bojo estelar de sua galáxia hospedeira, a qual no entanto, permanece opticamente resolvida. Espectroscopicamente, esses objetos são identificados por suas linhas de emissão intensas, que exibem variabilidade em luminosidade em escalas de tempo características de cada região emissora: de horas (raios-X) a dias (contínuo óptico-UV) e semanas (linhas de emissão) (Peterson, 1997). Esta variabilidade é um indicio direto de que a região emissora é compacta, com tamanho da ordem de dias-luz a poucos anos-luz.

A classificação das galáxias Seyfert divide-se tradicionalmente entre os tipos 1 e 2,

com base na largura de suas linhas espectrais. As Seyfert do tipo 1 apresentam linhas de emissão permitidas (por exemplo, da série de Balmer do hidrogênio) alargadas, com largura a meia altura (*FWHM*, do inglês *Full Width at Half Maximum*) superiores a 1000 km s^{-1} , indicativo de movimentos turbulentos em altas velocidades na região mais interna do núcleo. Em contraste, essas componentes largas estão ausentes ou são suprimidas no espectro das Seyfert do tipo 2. A Figura 1.1 ilustra exemplos característicos dos espectros de uma galáxia normal (não ativa) e de Seyferts tipo 1 e tipo 2.

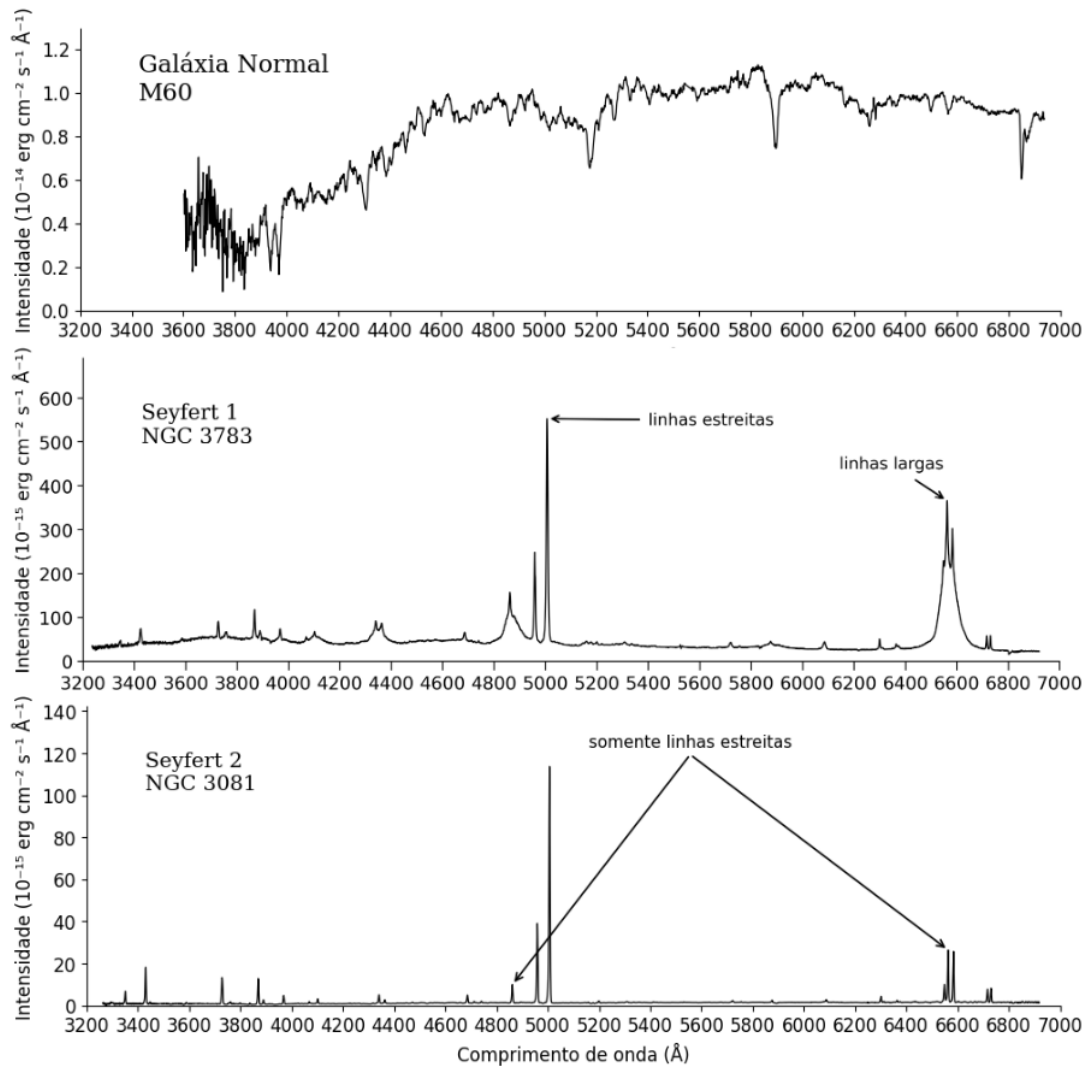


Figura 1.1: Exemplos espectrais característicos de galáxias. No painel superior é mostrado o espectro de uma galáxia normal (NGC 3368). O painel central apresenta a galáxia Seyfert 1 NGC 4151, onde são visíveis tanto as linhas estreitas quanto as linhas largas. No painel inferior observa-se a galáxia Seyfert 2 NGC 4941, que apresenta somente linhas estreitas. Fonte: Próprio autor.

Posteriormente, [Osterbrock \(1981\)](#) refinou esse esquema classificatório, introduzindo as subclasses intermediárias 1.5, 1.8 e 1.9. Essa subclassificação é baseada na intensidade relativa das componentes largas das linhas de Balmer no óptico. Nessa sequência, quanto maior o número da subclassificação, mais fraca é a detecção das linhas largas; em galáxias Seyfert do tipo 1.9, por exemplo, apenas uma componente alargada fraca da linha $H\alpha$ é

detectável, enquanto a $H\beta$ larga encontra-se substancialmente suprimida.

Um aspecto fundamental comum a todos os tipos de galáxias Seyfert é a presença proeminente de um sistema de linhas de emissão estreitas, com $FWHM$ tipicamente variando entre 300 e 1000 km s^{-1} . Este sistema inclui tanto linhas permitidas quanto linhas proibidas de baixa ionização, como [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ (35.1 eV), [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$ (14.5 eV), e [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$ (10.4 eV). Além dessas, são frequentemente detectadas linhas coronais de altíssima ionização, como [Fe X] $\lambda 6374$ (233.6 eV) e [Fe XIV] $\lambda 5303$ (361.0 eV) (Peterson, 1997). Os valores entre parênteses correspondem aos potenciais de ionização, ou seja, à energia necessária para produzir o íon emissor, expressos em elétron-volt (eV). A presença dessas linhas estreitas em todas as subclasses de galáxias Seyfert sugere que o mecanismo de ionização é o mesmo para toda a classe, amplamente aceito como sendo a fotoionização por um contínuo produzido na região nuclear. No entanto, a visão de que a fotoionização seria a única origem da ionização prevaleceu até cerca de duas décadas atrás. Trabalhos observacionais e modelos mais recentes mostram que algumas linhas, em particular linhas de alta ionização, podem ser parcialmente ou totalmente produzidas por processos associados a choques gerados por jatos e ventos que interagem com o meio interestelar (Müller-Sánchez *et al.*, 2011). Sinais observacionais da contribuição por choque incluem componentes com alargamento das linhas, deslocamentos sistemáticos de velocidade e emissão espacialmente correlacionada a estruturas de jato ou regiões de interação. Assim, a interpretação atual é que a ionização na região de linhas estreitas (NLR, do inglês *narrow line region*) frequentemente resulta de uma combinação de fotoionização e de processos induzidos por choque, sendo que a contribuição relativa de cada mecanismo depende da fonte, da distância ao núcleo, da presença de jatos e das propriedades locais do meio.

1.2.2 Quasares

Os quasares representam os AGNs mais luminosos e estão entre as fontes mais brilhantes do universo, capazes de ofuscar a luz integrada de suas galáxias hospedeiras e serem detectados até os confins do universo observável. Sua descoberta, na década de 1960, foi um marco decisivo para a astrofísica moderna, atualmente o quasar mais distante já confirmado encontra-se em $z \sim 10$ (Natarajan *et al.*, 2023). Inicialmente identificados como fontes de rádio compactas com contrapartidas ópticas de aparência estelar, a natureza verdadeiramente extragaláctica desses objetos foi confirmada apenas com a medida de seus redshifts, que revelaram distâncias cosmológicas (Schmidt, 1963). O termo *quasar*, uma contração de *quasi-stellar radio source* (fonte de rádio quase estelar), reflete esta ambiguidade morfológica inicial. Posteriormente, objetos com propriedades espectrais idênticas, mas sem emissão de rádio significativa, foram descobertos, sendo genericamente denominados Objetos Quase Estelares (QSOs, do inglês *Quasi-Stellar Objects*).

Espectroscopicamente, os quasares compartilham características fundamentais com as galáxias Seyfert, exibindo um contínuo não térmico e um conjunto de linhas de emissão largas e estreitas superpostas. No entanto, distinguem-se destas principalmente pela sua luminosidade absoluta extremamente elevada (tipicamente luminosidades bolométricas da ordem de $L_{\text{bol}} \sim 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, enquanto galáxias Seyfert apresentam habitualmente $L_{\text{bol}} \sim 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) (Shen *et al.*, 2020; Weedman, 1983) e pelo fato de que o brilho de seu núcleo ativo domina completamente a luz da galáxia hospedeira, tornando-a difícil de ser resolvida em imagens de campo profundo (Kellermann, 1999). Além disso, em muitos quasares, as características de absorção estelar típicas de uma galáxia subjacente são muito fracas ou indetectáveis, e as linhas estreitas tendem a ser menos proeminentes em comparação com as componentes largas, embora o mecanismo de ionização seja essencialmente o mesmo. A classe dos quasares exibe uma notável diversidade, incluindo subtipos como os *radio-loud* (com forte emissão de rádio, frequentemente associada a jatos relativísticos) e os *radio-quiet* (com emissão de rádio fraca ou ausente), sendo estes últimos numericamente dominantes (Kellermann *et al.*, 1989). Essa distinção é tipicamente baseada na razão entre luminosidades rádio/óptico e não define um limite físico estrito entre as populações, sendo o valor dessa razão = 10 o mais aceito na literatura.

1.2.3 Blazares

Os blazares constituem uma classe extrema de AGNs caracterizada por propriedades observacionais únicas, incluindo variabilidade rápida e de grande amplitude em todo o espectro eletromagnético, alto brilho aparente, elevado grau de polarização óptica e de rádio, e espectros dominados pelo contínuo do jato. Estas propriedades são consistentemente interpretadas no paradigma do modelo unificado de AGNs como sendo o resultado da orientação do jato relativístico de plasma muito próximo à linha de visada do observador (geralmente ângulos $\theta < 20^\circ$) (Blandford & Rees, 1978).

A classe dos blazares é tradicionalmente subdividida em dois grupos principais: os *BL Lacertae objects* (ou BL Lacs), que exibem espectros com linhas de emissão particularmente fracas ou inexistentes, e os *Flat Spectrum Radio Quasars* (FSRQs), que, embora dominados pelo jato, ainda apresentam linhas largas típicas de quasares (Stocke *et al.*, 1991).

Ambos os tipos apresentam distribuições espectrais de energia (SEDs) dominadas por dois picos: o primeiro, associado à emissão síncrotron, cuja posição pode variar (dependendo dos parâmetros físicos da fonte) do infravermelho até os raios X moles (*soft X-ray*), e o segundo em altas energias, nos raios X duros (*hard X-ray*) a raios-gama, atribuído ao espalhamento Compton inverso (Fossati *et al.*, 1998).

Nesta configuração quase alinhada, os efeitos de relatividade especial, como o efeito Doppler relativístico, amplificam drasticamente o brilho intrínseco da emissão do jato e

comprimem as escalas de tempo de variabilidade. Consequentemente, a radiação síncrotron do jato, e sua possível componente Compton inverso, dominam completamente o espectro, ofuscando as características produzidas por componentes nucleares não relativísticos, como a emissão térmica do disco de acreção e as linhas originadas na região de linhas largas (BLR, do inglês *Broad Line Region*), que não são afetados pelo Doppler relativístico associado ao fluxo do jato e em geral, apresentam movimentos dominados por rotação e dispersão de velocidades muito menores que as do jato.

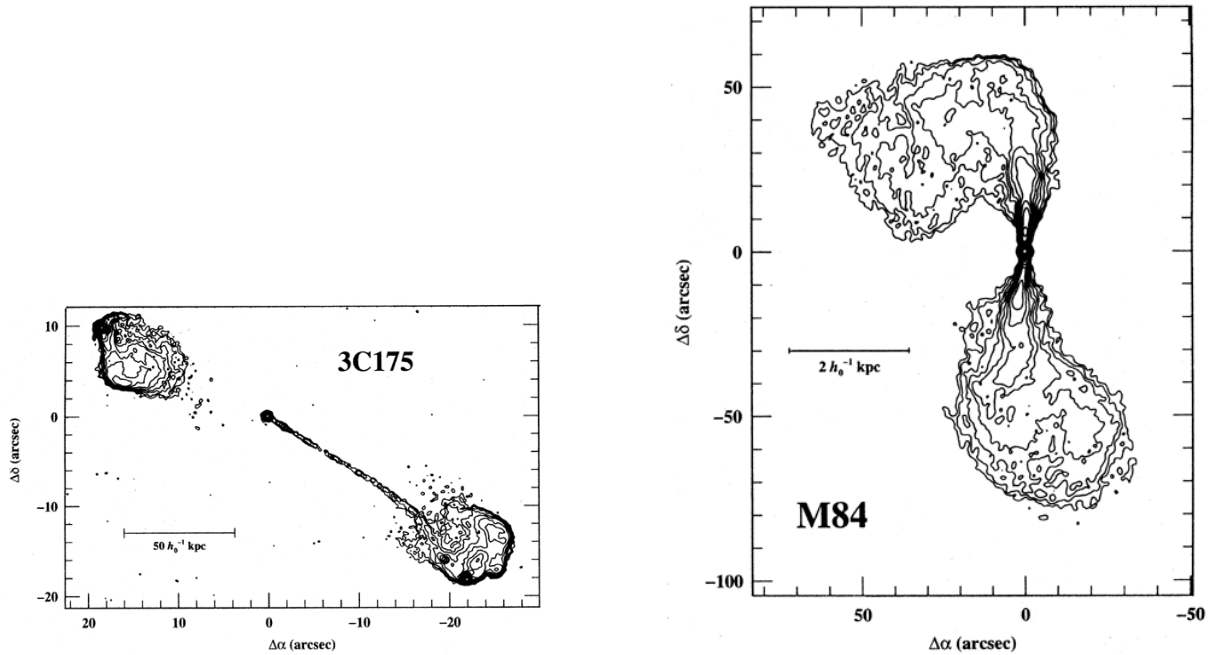
1.2.4 Radiogaláxias

Dentre os núcleos ativos de galáxias, as radiogaláxias se destacam por sua emissão estendida na forma de jatos na banda de rádio, frequentemente alcançando escalas lineares de centenas de quiloparsecs, além da região óptica da galáxia hospedeira. Essas fontes estão geralmente associadas a galáxias elípticas gigantes, muitas vezes situadas em ambientes densos de grupos ou aglomerados. A emissão de rádio é majoritariamente de origem síncrotron (detalhes na Seção 1.3.1), resultante da aceleração de elétrons relativísticos em campos magnéticos presentes nos jatos bipolares que emergem do núcleo. Ao se propagarem pelo meio interestelar e intergaláctico, estes jatos injetam energia e *momentum* (quantidade de movimento), levando à formação de extensas estruturas lobulares. A expansão desses lóbulos é conduzida pela pressão de um 'casulo' de plasma produzida pelo próprio jato.

Espectroscopicamente, as radiogaláxias exibem uma diversidade semelhante à observada em outras classes de AGNs. Podem ser classificadas como radiogaláxias emissoras de linhas largas (Broad Line Radio Galaxies – BLRG) ou de linhas estreitas (Narrow Line Radio Galaxies – NLRG), em um paralelo direto à dicotomia Seyfert 1/Seyfert 2. Essa analogia sustenta fortemente o modelo unificado de AGNs, nos quais a orientação da estrutura nuclear em relação à linha de visada (obscurecendo ou não a região nuclear e, consequentemente, a BLR) é o fator primordial (Antonucci, 1993).

Um marco fundamental na compreensão dessas fontes foi estabelecido por Fanaroff & Riley (1974), que propuseram a classificação morfológica hoje conhecida como esquema de Fanaroff–Riley. Nele, as radiogaláxias são divididas em dois tipos principais com base na distribuição de brilho ao longo da estrutura de rádio, como mostrado na figura 1.2. As fontes FR I apresentam emissão rádio mais brilhante em regiões próximas ao núcleo, e que se torna progressivamente difusa e menos luminosa em direção às extremidades. Esse comportamento sugere desaceleração do fluxo de plasma e forte interação turbulenta com o meio circundante. Em contraste, as fontes FR II exibem jatos altamente colimados que terminam em *hotspots* intensos e bem definidos, pontos de maior brilho da emissão, associados ao impacto do jato com o meio intergaláctico e à formação dos lóbulos. Essa distinção morfológica está intimamente correlacionada com a potência de rádio da fonte:

as radiogaláxias FR II são sistematicamente mais luminosas na banda de rádio do que as FR I, com um limiar de separação situado tipicamente em torno de $L_{1.4, \text{GHz}} \sim 10^{25} \text{ W Hz}^{-1}$ (Ledlow & Owen, 1996). Esse limiar de luminosidade, acima do qual os *hotspots* estáveis das FR II se formam, sugere que a potência do jato é o parâmetro fundamental que molda a morfologia da fonte em grande escala.



(a) Galáxia rádio do tipo FR II (3C175).

(b) Galáxia rádio do tipo FR I (M84).

Figura 1.2: Exemplos de radiogaláxias com morfologias distintas: (a) uma fonte do tipo FR II, caracterizada por lóbulos bem definidos e regiões de brilho nas extremidades; (b) uma fonte do tipo FR I, com emissão difusa e brilho mais concentrado próximo ao núcleo. Adaptado de Peterson (1997)

1.3 Jatos Relativísticos

Uma das características mais impressionantes de uma subclasse de AGNs, particularmente os blazares e as radiogaláxias, é a capacidade de ejetar jatos colimados de plasma a velocidades relativísticas. Estes jatos são compostos por partículas carregadas (elétrons e possivelmente pósitrons ou prótons), que se movem espiralando ao longo de campos magnéticos, emitindo radiação síncrotron através de um vasto intervalo do espectro, desde as baixas frequências de rádio até os raios gama de alta energia. O processo de formação dos jatos está intrinsecamente ligado à complexa interação entre o disco de acreção, o buraco negro em rotação e os campos magnéticos intensos na região mais interna do sistema. Modelos teóricos, como o processo de Blandford–Znajek, sugerem que a energia rotacional do buraco negro pode ser extraída magneticamente, servindo como o motor central para a aceleração e colimação do jato (Blandford & Znajek, 1977). À medida que estes jatos se propagam para fora do núcleo galáctico, eles podem permanecer confinados e estáveis

por centenas de quiloparsecs, interagindo com o meio interestelar e intergaláctico circundante. Estas interações dão origem a estruturas lobulares expansivas e, em muitos casos, a regiões de choque brilhantes que marcam a conversão de energia cinética em radiação e calor.

1.3.1 Radiação Síncrotron

A radiação síncrotron é o processo físico dominante responsável pela emissão contínua que caracteriza as radiogaláxias e outros AGNs em frequências de rádio e, em alguns casos, sua emissão se estende ao óptico e até raios-X. Este mecanismo de emissão ocorre quando elétrons relativísticos (ou outras partículas carregadas como prótons e pósitrons) se movem em trajetórias helicoidais ao longo de linhas de campo magnético. À medida que espiralam, estas partículas sofrem aceleração centrípeta e, de acordo com o eletromagnetismo clássico, irradiam energia.

A frequência crítica ν_{sync} desta radiação, na qual a potência emitida é máxima para um dado elétron, é proporcional ao quadrado da energia da partícula (ou fator de Lorentz γ) e à intensidade da componente perpendicular do campo magnético B_{\perp} :

$$\nu_{\text{sync}} \approx \frac{3}{4\pi} \frac{eB_{\perp}}{m_e c} \gamma^2, \quad (1.1)$$

onde e é a carga do elétron, m_e é a massa do elétron e c é a velocidade da luz. Como uma população de elétrons possui uma distribuição de energias, caracterizada tipicamente através de uma função de lei de potência $N(E)dE \propto E^{-p}dE$, a emissão resultante integrada sobre todas as partículas produz um espectro de potência também na forma de uma lei de potência, $S_{\nu} \propto \nu^{\alpha}$, onde o índice espectral α está diretamente relacionado ao índice da distribuição de energia dos elétrons por $\alpha = (1-p)/2$. Para elétrons com uma distribuição de energia típica ($p \sim 2-3$), isso resulta em um espectro com índice $\alpha \sim -0.5$ a -1.0 , que é efetivamente o observado nas radiogaláxias (Ghisellini, 2013).

Um aspecto crucial da radiação síncrotron é a sua polarização. Por ser emitida de forma preferencial em uma direção perpendicular ao campo magnético local, a radiação síncrotron é parcialmente polarizada. O grau de polarização teórico máximo para um elétron único é da ordem de 75%, mas para uma população de elétrons com uma distribuição de energias em um campo magnético desordenado, atinge porcentagens de polarização de algumas dezenas. A medida da polarização e de sua direção é uma ferramenta poderosa para mapear a estrutura e a ordenação dos campos magnéticos nas fontes de rádio extragalácticas (Pacholczyk, 1970).

Finalmente, os elétrons responsáveis pela emissão síncrotron perdem energia devido a este próprio processo de radiação. O tempo de resfriamento (*cooling time*) para um elétron de energia E é inversamente proporcional à sua energia e à intensidade do campo magnético:

$$t_{\text{cool}} \propto \frac{1}{\gamma B^2}. \quad (1.2)$$

Esta dependência tem implicações profundas para a evolução morfológica das rádio-galáxias. Elétrons de alta energia (que emitem em frequências mais altas) perdem energia mais rapidamente do que elétrons de baixa energia (que emitem em frequências mais baixas). Conseqüentemente, após a cessão da atividade do jato, as regiões de alta frequência (*e.g.*, 3 GHz) tornam-se rapidamente fracas, enquanto a emissão de baixa frequência (*e.g.*, 144 MHz), associada a elétrons de vida mais longa, persiste por dezenas de milhões de anos. Este é exatamente o princípio que permite que levantamentos em baixas frequências, como o LOFAR, detectem a emissão remanescente de episódios de atividade anteriores de jatos, que são invisíveis em levantamentos de altas frequências (Longair, 2011).

1.4 Fontes de Rádio Compactas: Paradigma Evolutivo

Em escalas menores, as fontes de rádio compactas, como as de Espectro com Pico em Gigahertz (GPS, dos Inglêss *Giga-Hertz Peaked Spectrum*) e Espectro Íngreme Compacto (CSS, do Inglês Compact Steep Spectrum), são entendidas como representantes dos estágios iniciais de evolução das radiogaláxias. Com jatos que apresentam extensões lineares inferiores a 20 kpc e idades estimadas entre 10^3 e 10^5 anos, esses objetos são interpretados como jatos jovens que ainda se encontram confinados no interior de suas galáxias hospedeiras, interagindo intensamente com o meio circumnuclear denso e poeirento (Fanti *et al.*, 1995; O’Dea, 1998).

Um modelo evolutivo clássico, frequentemente citado na literatura, postula um caminho contínuo no qual as fontes GPS, com tamanhos da ordem de centenas de parsecs, evoluíram para fontes CSS, com alguns kiloparsecs de extensão, até eventualmente se tornarem radiogaláxias estendidas do tipo FR I ou II, alcançando centenas de kiloparsecs (Readhead *et al.*, 1996). Nesse cenário, a expansão dos jatos seria acompanhada por uma diminuição gradual na densidade de fluxo no espectro rádio, resultante da propagação em um meio menos denso e opticamente fino, dominado por perdas radiativas da população de elétrons (Fanti *et al.*, 2001; O’Dea, 1998; Snellen *et al.*, 2000).

1.4.1 Atividade Intermitente dos Jatos

Contudo, observações e levantamentos estatísticos revelaram uma notável superabundância de fontes compactas em relação ao número de fontes estendidas, uma discrepância que o modelo evolutivo linear clássico tem dificuldade em explicar (Turner & Shabala, 2015). Essa superabundância sugere que uma fração significativa dos jatos não completa sua evolução para a fase estendida. As razões para essa interrupção precoce podem ser variadas, incluindo a exaustão do suprimento de material acretado, o confinamento por

um meio circumnuclear extremamente denso, ou a ocorrência de instabilidades no disco de acreção que suprimem a formação dos jatos (Kunert-Bajraszewska *et al.*, 2010; Morganti, 2024; Schoenmakers *et al.*, 2000b).

Alternativamente, propõe-se que muitos AGNs exibam uma atividade intrinsecamente intermitente, caracterizada por episódios discretos de atividade separados por períodos de quiescência que podem durar de milhões a dezenas de milhões de anos. Neste paradigma cíclico, um episódio de atividade recente pode dar origem a uma fonte compacta (GPS ou CSS) que está, na verdade, embutida dentro de uma estrutura lobular muito mais extensa e difusa, remanescente de um surto de atividade anterior (Saikia & Jamrozy, 2009). Esses objetos, denominados "jatos reiniciados", apresentam uma morfologia complexa que combina componentes compactos e jovens com emissão extensa e envelhecida. Este esquema é ilustrado na figura 1.3

Evidências observacionais robustas para este cenário vêm se acumulando, graças em grande parte ao advento de levantamentos em baixas frequências, como o LoTSS (do Inglês *LOFAR Two-metre Sky Survey*), que oferecem sensibilidade incomparável para detectar a emissão síncrotron de baixo brilho superficial associada aos elétrons mais velhos e de menor energia presentes nos lóbulos remanescentes (Shimwell *et al.*, 2022). Estudos recentes utilizando dados do LOFAR revelaram que uma fração substancial (vinte a vinte e cinco por cento) das fontes classicamente classificadas como GPS/CSS exibe, na verdade, halos ou lóbulos difusos em escalas de centenas de kiloparsecs, claramente indicativos de atividade prévia (Brienza *et al.*, 2016; Jurlin *et al.*, 2020). Casos extremos, conhecidos como radiogaláxias "duplo-duplo" (*double-double radio galaxies*), chegam a exibir múltiplos pares de lóbulos aninhados, correspondentes a episódios sucessivos de atividade do jato (Schoenmakers *et al.*, 2000a). Em alguns desses sistemas, observam-se desalinhamentos entre o eixo dos jatos mais jovens e a orientação da emissão remanescente mais antiga, característica que pode indicar variações no eixo de ejeção ao longo do tempo, possivelmente causadas por processos como a reorientação do buraco negro (a partir de fusões) e a precessão do disco de acreção. Essas assinaturas morfológicas reforçam a ideia de que o ciclo de atividade dos jatos pode ser acompanhado por alterações dinâmicas expressivas na geometria do sistema, além de simplesmente variar em potência e duração (Saikia & Jamrozy, 2009).

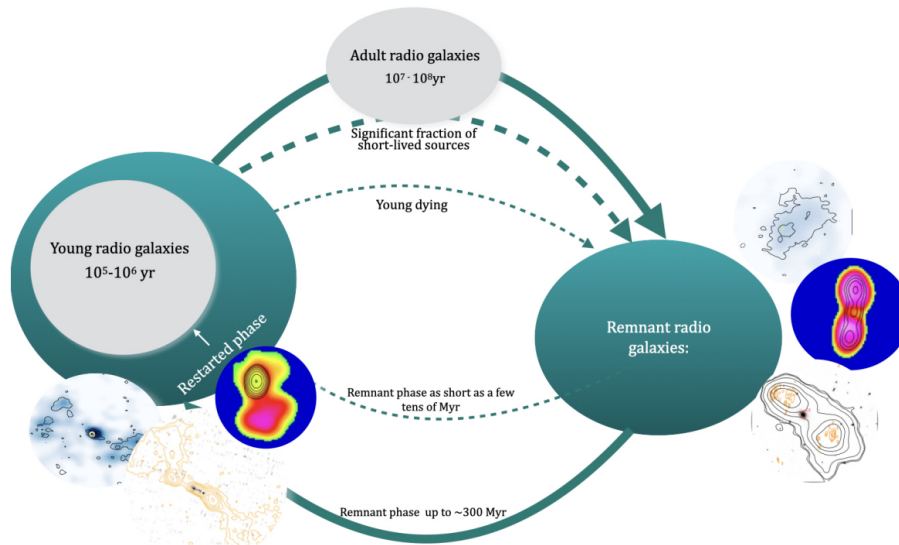


Figura 1.3: Esquema do ciclo de vida das radiogaláxias, mostrando fases jovens, adultas, remanescentes (*remnant*) e reiniciadas (*restarted*). As idades indicativas estão anotadas nas elipses; setas contínuas representam a via evolutiva principal enquanto setas tracejadas indicam caminhos alternativos (por exemplo envelhecimento rápido, morte precoce ou reinício). As ilustrações anexas exemplificam assinaturas observacionais: núcleos compactos com pico em GHz (GPS/HFP), estruturas com lóbulos estendidos visíveis em baixa frequência (CSS/*remnant*) e pares aninhados de lóbulos em casos de reinício (*double-double*). Fonte: (Morganti, 2024).

1.5 Objetivos

Esta nova perspectiva coloca um desafio significativo para os catálogos tradicionais de fontes GPS e CSS. Estes catálogos foram majoritariamente construídos com base em levantamentos realizados em frequências acima de 1 GHz, como o FIRST e o NVSS, os quais são sensíveis principalmente aos componentes compactos e jovens, mas praticamente cegos para a emissão difusa e estendida de baixa frequência oriunda de eventos antigos. Embora levantamentos históricos tenham sido conduzidos em baixas frequências como o Texas e 7C, sua baixa resolução angular frequentemente impossibilitava a distinção entre componentes compactos e estendidos, registrando muitas fontes como um único ‘borrão’ morfológico. Como consequência, uma população potencialmente grande de fontes reiniciadas, que possuem um núcleo jovem e compacto embutido em uma estrutura remanescente difusa, pode ter sido incorretamente classificada como simplesmente compactas nesses catálogos.

É neste contexto que o presente trabalho se insere. Nosso objetivo principal é reavaliar sistematicamente uma amostra previamente classificada como CSS/GPS (Nascimento *et al.*, 2022), utilizando a combinação de dados multifrequência, com base no LoTSS (144 MHz). Para conduzir esta investigação, estabelecemos os seguintes objetivos específicos: (1) confirmar, por meio da alta resolução do LoTSS e do FIRST, a morfologia compacta das fontes na banda de 144 MHz e 1.4 GHz, respectivamente, validando (ou não) sua

classificação original; (2) construir as SEDs com dados de rádio de múltiplas frequências para caracterizar precisamente o *turnover* espectral e o índice espectral de cada fonte, confirmando sua natureza de espectro com pico; e (3) aprender e aplicar técnicas de análise de dados interferométricos com o software CASA para uma extração robusta de parâmetros morfológicos e fotométricos. Através da análise comparativa de parâmetros e principalmente o contraste morfológico entre frequências, buscaremos identificar assinaturas de reinício da atividade do jato, onde a detecção de emissão estendida e difusa em 144 MHz, contrastando com uma morfologia compacta em 1.4 GHz, serve como o principal indicativo de uma fonte reiniciada.

Este estudo não apenas visa contribuir para um censo mais preciso da população de jatos reiniciados, mas também busca aprofundar nossa compreensão sobre o ciclo de vida das radiogaláxias e a importância do *feedback* exercido por múltiplos episódios de atividade no ecossistema galáctico. A confirmação de que uma fração relevante das fontes compactas são, na verdade, fontes reiniciadas teria implicações profundas para nossos modelos de evolução de fontes rádio e para o papel dos AGNs na evolução das galáxias ao longo do tempo.

Capítulo 2

Radioastronomia e Levantamentos

Neste capítulo apresentamos uma visão geral da radioastronomia, destacando os princípios de interferometria e síntese de abertura que sustentam a formação das imagens em rádio. Em seguida, descrevemos os levantamentos utilizados no trabalho, discutindo parâmetros observacionais relevantes como frequência, resolução, sensibilidade, cobertura e formato dos catálogos. Esses aspectos impactam diretamente tanto a construção das distribuições espectrais de energia quanto a análise morfológica multifrequência. O objetivo é oferecer um referencial que permita compreender as vantagens e limitações dos conjuntos de dados aqui considerados, incluindo a capacidade de detectar estruturas de baixo brilho superficial e a resolução angular necessária para identificar componentes estendidos.

2.1 Radioastronomia e Instrumentação

A radioastronomia observa o céu em comprimentos de onda muito maiores que o óptico, permitindo o estudo de processos físicos e componentes galácticos que são invisíveis em outras bandas (emissão síncrotron de jatos e lóbulos, linhas de HI 21 cm, moléculas, etc.) (Condon & Ransom, 2016; Wilson *et al.*, 2013). Em razão do comprimento de onda e do conseqüente grande diâmetro necessário para obter alta resolução angular, a radioastronomia moderna faz amplo uso de arranjos (*arrays*) interferométricos, nos quais várias antenas são correlacionadas para sintetizar aberturas efetivamente muito maiores, superando em muito o limite de resolução de um único radiotelescópio. (Thompson *et al.*, 2017)

2.1.1 Princípio da interferometria e síntese de abertura

O princípio fundamental da interferometria é baseado na linha de base (*baseline*) formada por um par de antenas, ou seja, a linha que conecta duas antenas do *array*. O sinal combinado desse par corresponde a uma medida de interferência que amostra uma frequência espacial específica no plano *uv*. A distância e a orientação da *baseline* deter-

minam tanto a resolução quanto as escalas angulares da imagem reconstruída, de modo que cada par de antenas contribui com uma componente distinta do plano de frequências espaciais (u, v) . Ao longo da observação (movimento de rotação da Terra) a projeção das *baselines* preenche o plano uv , e a transformada de Fourier inversa do conjunto de amostras fornece a imagem do céu. A qualidade da imagem depende diretamente do preenchimento do plano uv (densidade e distribuição das amostras) e do tempo de integração. Por isso, *arrays* com mais antenas e/ou maiores tempos de observação produzem melhor sensibilidade a estruturas em diferentes escalas e melhor dinâmica de imagem. (Thompson *et al.*, 2017)

A relação entre a cobertura do plano uv e a qualidade da imagem resultante é ilustrada na Figura 2.1. Os painéis mostram como diferentes tempos de integração afetam a distribuição de amostras no plano uv (esquerda) e a correspondente imagem reconstruída (direita) obtida através da transformada inversa de Fourier dessas amostras. Observa-se claramente que coberturas mais esparsas (tempos curtos) produzem padrões de lóbulos laterais (*sidelobes*) e maior contaminação por estruturas do feixe sintetizado, enquanto integrações mais longas preenchem melhor o plano uv , reduzindo artefatos e melhorando a sensibilidade a escalas estendidas.

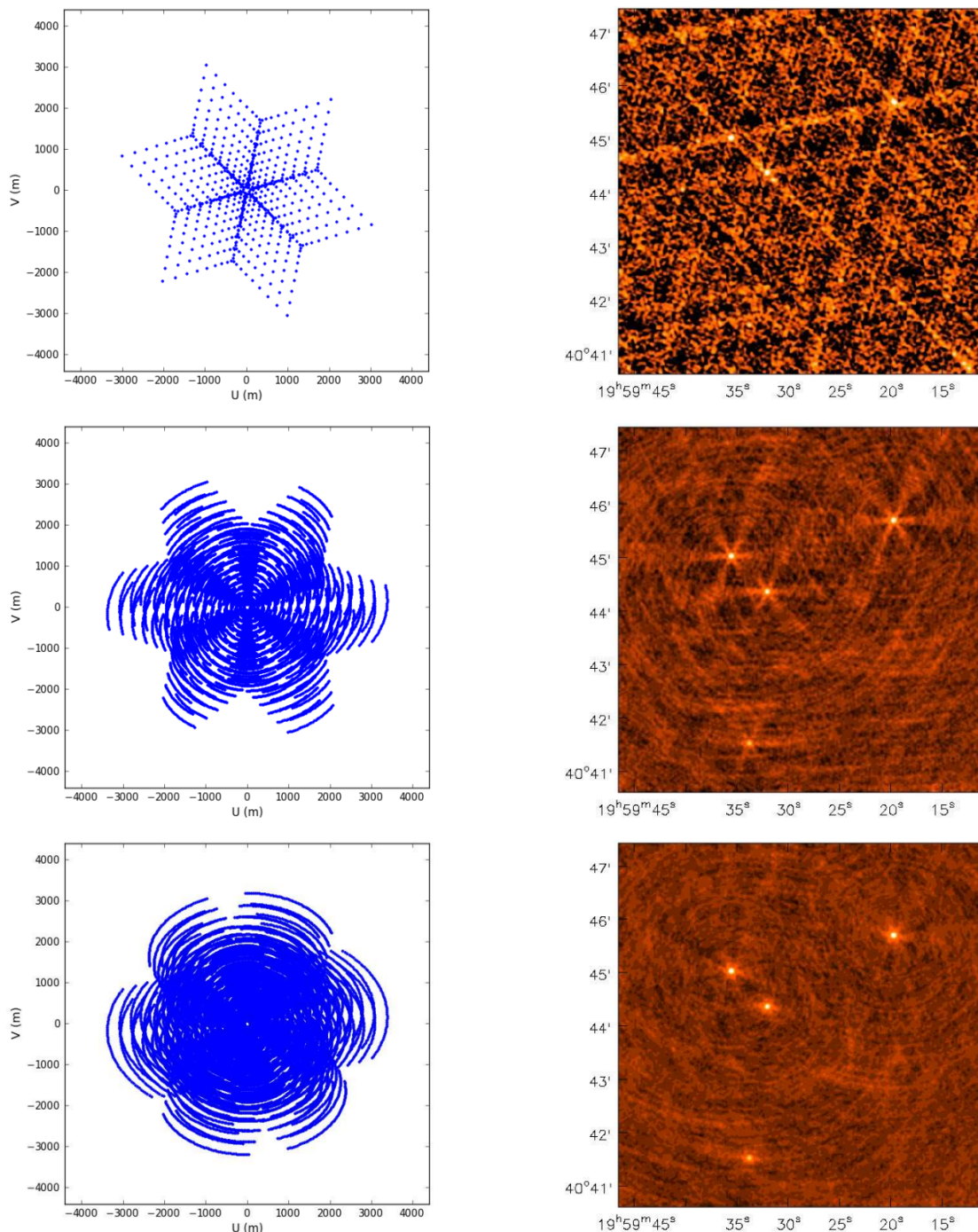


Figura 2.1: Ilustração do efeito do preenchimento do plano uv com um *array* composto por 27 antenas. Em cada par de painéis, à esquerda apresenta-se os pontos amostrados no plano uv e à direita a imagem do campo correspondente obtida a partir dessas amostras. Dos painéis superiores para os inferiores: (i) cobertura com alguns minutos de integração, (ii) cobertura com 2 horas de integração, e (iii) cobertura com 4 horas de integração. Coberturas curtas produzem imagens menos nítidas e com artefatos residuais do feixe sintetizado devido à amostragem incompleta do plano uv ; integrações mais longas preenchem melhor o plano uv , reduzindo esses efeitos e melhorando a qualidade da imagem reconstruída. Disponível em: [Reducing Observations from the JVLA, ALMA, ATCA and EVLBI](#)

2.1.2 Telescópios, arquiteturas e levantamentos

Para superar o desafio da baixa resolução angular inerente aos longos comprimentos de onda de rádio, a radioastronomia moderna recorre a duas principais arquiteturas instrumentais. A primeira engloba as antenas do tipo prato (*dishes*) como por exemplo o VLA, caracterizado por grande versatilidade espectral e boa sensibilidade em diversas frequências (Perley *et al.*, 2011). A segunda arquitetura é formada por *arrays* de elementos simples, geralmente dipolos montados em estações ou *tiles*, como é o caso do LOFAR (van Haarlem *et al.*, 2013). Esses *arrays* costumam ter uma distribuição espacial espalhada, ou seja, os elementos individuais não preenchem a área do coletor de forma contínua, o que influencia o preenchimento do plano uv e, conseqüentemente, a sensibilidade a diferentes escalas angulares. Na prática, *arrays* esparsos são muito eficientes para observar em baixas frequências e para cobrir grandes campos de visão simultaneamente, enquanto os de tipo prato oferecem maior flexibilidade de configuração e melhor resposta em frequências médias a altas. A escolha entre uma arquitetura e outra define parâmetros observacionais fundamentais: a resolução angular ($\propto \lambda/D$), a sensibilidade a brilho superficial (função do tempo de integração, densidade de amostras no plano uv) e as escalas angulares que podem ser recuperadas sem perda significativa de fluxo (Thompson *et al.*, 2017). Por isso, levantamentos com arquiteturas e frequências diferentes atuam de forma complementar na caracterização de fontes rádio.

2.1.3 Parâmetros observacionais relevantes

Para interpretar catálogos e construir SEDs é importante ter em mente os seguintes aspectos observacionais e instrumentais:

- **Frequência e largura de banda:** determinam quais populações de elétrons e quais processos físicos dominam a emissão em cada ponto do espectro. Em geral, frequências mais altas respondem à emissão de elétrons de maior energia e sofrem perdas radiativas mais rápidas, por isso a presença de curvaturas espectrais revela envelhecimento, combinação de componentes ou mudanças nas condições físicas do emissor.
- **Resolução angular e baseline:** determina se uma componente é resolvida ou aparece como fonte pontual. A resolução aproximada segue $\theta \approx \lambda/D_{\max}$, baselines longas fornecem maior resolução, enquanto baselines curtas apresentam maior sensibilidade a estruturas de grande escala.
- **Sensibilidade a brilho superficial e sensibilidade pontual:** a sensibilidade a brilho superficial escala aproximadamente como $\sigma_{\text{rms}} \times \theta_{\text{beam}}^2$. Levantamentos com

feixe maior são mais eficientes para detectar emissão difusa e de baixo brilho superficial; levantamentos de alta resolução destacam núcleos compactos e detalhes finos, embora ainda possam detectar emissão estendida quando suficientemente brilhante.

- **Cobertura temporal / épocas de observação:** observações não simultâneas implicam que variabilidade do núcleo (ou mudanças estruturais) pode produzir discrepâncias na SED; é importante registrar as épocas e, quando possível, usar medidas contemporâneas ou tratar pontos discrepantes.
- **RFI (Interferência por Radiofrequência):** contaminação por emissões artificiais (terrestres ou de satélites) que afeta diretamente a qualidade dos dados. A presença de RFI reduz a sensibilidade e pode limitar a faixa de frequência e tempo disponível para análise.
- **Calibração e escala de fluxo:** levantamentos diferem na forma como reportam fluxos (pico ou integrado), e em suas unidades. Para análises comparativas, é essencial normalizar os valores considerando o tamanho do feixe sintetizado, de modo a obter medidas consistentes entre diferentes catálogos.
- **Cobertura uv :** preenchimento do plano uv e algoritmos de deconvolução (por exemplo, *CLEAN*) afetam a recuperação de estruturas em diferentes escalas e a presença de artefatos na imagem reconstruída.
- **Precisão astrométrica:** deslocamentos de posição entre levantamentos impactam associações de contrapartida e devem ser verificados e, quando necessário, corrigidos.

2.2 Levantamentos

Antes de descrevermos, em detalhe, cada levantamento utilizado neste trabalho, convém apontar que selecionamos oito levantamentos que, em conjunto, cobrem faixas de frequência e resoluções complementares. A combinação desses catálogos permite explorar tanto a emissão de baixo brilho superficial quanto componentes compactas em diferentes escalas angulares. Nas subseções a seguir apresentamos primeiro o instrumento LOFAR, por sua importância central neste trabalho e para contextualizar as imagens e a configuração do *array* e, em seguida, detalhamos o LoTSS DR2 e os demais levantamentos empregados.

2.2.1 O radiotelescópio LOFAR: arquitetura e imagens representativas



Figura 2.2: Núcleo do LOFAR (Superterp) nos Países Baixos, mostrando a concentração densa de antenas que proporciona alta sensibilidade para emissão extensa. Disponível em: [Netherlands Institute for Radio Astronomy](#).

O LOFAR (LOw Frequency ARray) é atualmente o maior radiotelescópio operando nas menores frequências observáveis a partir da Terra. Trata-se de um interferômetro composto por estações constituídas por dipolos/tiles e uma infraestrutura computacional e de rede capaz de processar volumes de dados extremamente grandes (chegando a atingir ~ 16 terabytes de dados em uma observação de 8 horas). A arquitetura distribuída do LOFAR (com um núcleo denso, estações remotas e estações internacionais) confere ao instrumento uma combinação única de sensibilidade a escalas grandes (baselines curtas) e potencial de alta resolução (quando são utilizadas as baselines longas). Essas características tornam o LOFAR especialmente adequado para programas de levantamento de céu profundo e para estudos de emissão difusa, pulsares e fenômenos transientes. (Shimwell *et al.*, 2017)

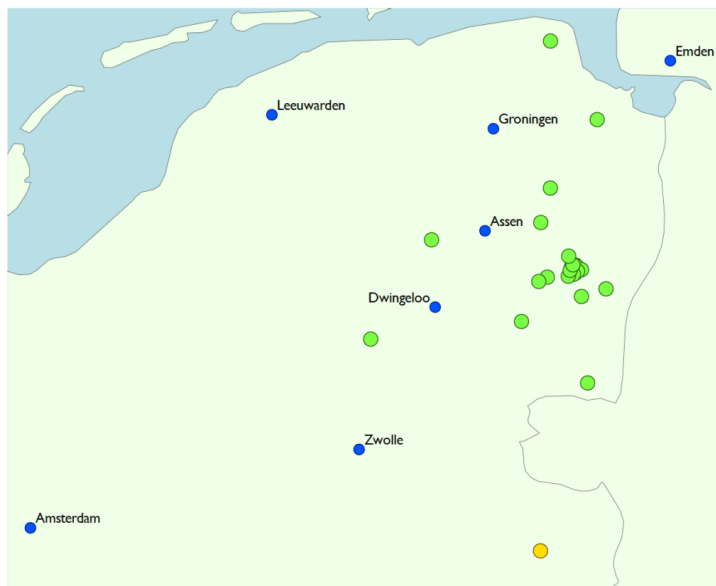


Figura 2.3: Distribuição das estações remotas do LOFAR no território neerlandês, localizadas a distâncias de até ~ 90 km do centro do arranjo e assim estendendo as linhas de base para melhorar a resolução angular. Pontos em azul representam as estações centrais, em verde indicam estações remotas completas e operacionais; pontos em amarelo representam estações que estavam em construção no ano de 2013. Disponível em: [Netherlands Institute for Radio Astronomy](#).

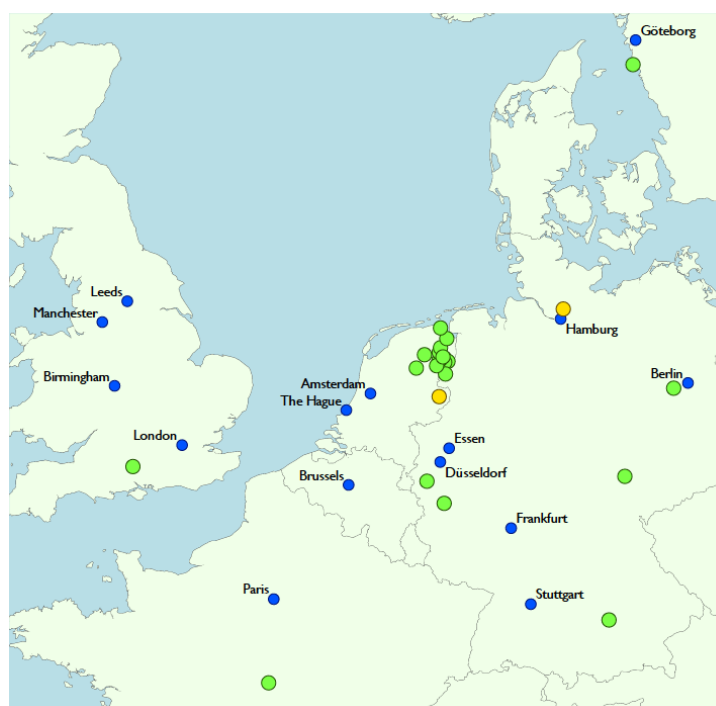


Figura 2.4: Rede internacional de estações LOFAR na Europa, proporcionando baselines muito longas para alta resolução (~ 1000 km). O esquema de cores é o mesmo da figura 2.3. Disponível em: [Netherlands Institute for Radio Astronomy](#).

A configuração ilustrada nas Figuras 2.2, 2.3 e 2.4 explica por que o LOFAR pode operar em modos muito diferentes: o *Superterp* fornece as *baselines* mais curtas e grande

área coletora, maximizando sensibilidade à emissão difusa de baixa superfície de brilho; as estações remotas aumentam a resolução até algumas dezenas de segundos de arco, já as estações internacionais estendem ainda mais as *baselines*, permitindo imagens de alta resolução em observações direcionadas. Esses modos de operação e a capacidade de formar múltiplos feixes tornam o LOFAR extremamente versátil para levantamentos e observações guiadas por alvos.

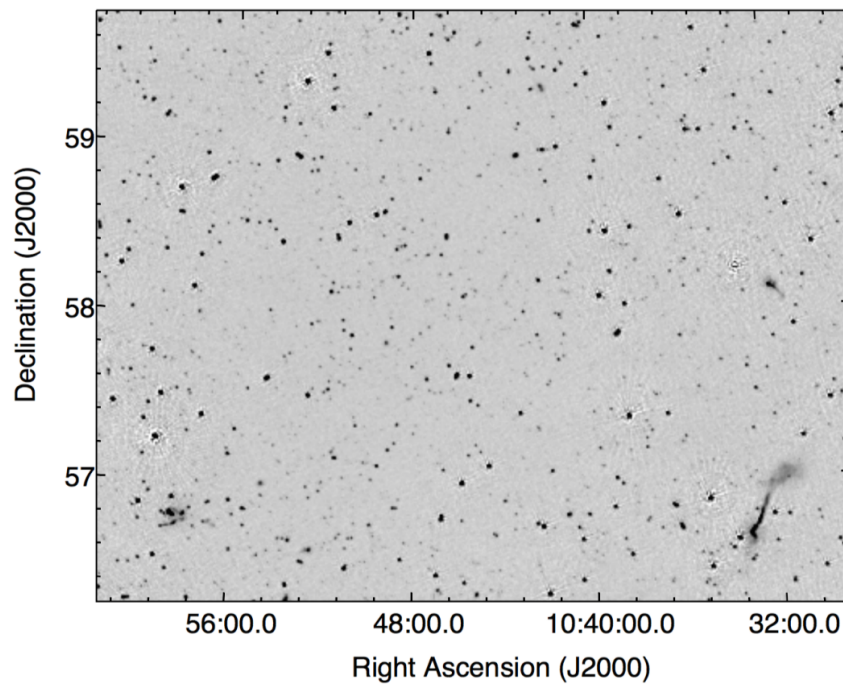


Figura 2.5: Exemplo de campo profundo do LOFAR (Lockman Hole) a ~ 150 MHz, demonstrando a sensibilidade do instrumento a fontes fracas e extensas. Adaptado de (Brienza *et al.*, 2016).

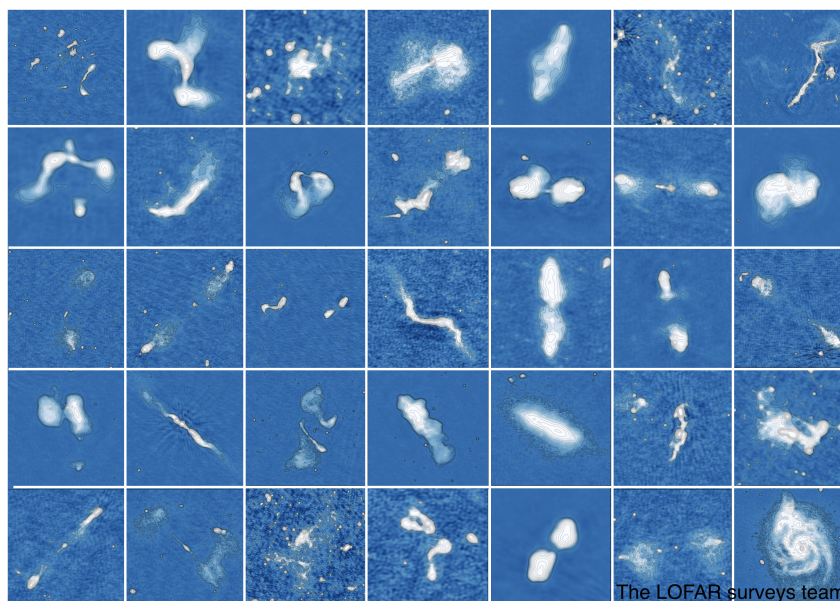


Figura 2.6: Montagem de fontes estendidas detectadas pelo LoTSS, mostrando a diversidade de morfologias reveladas pela alta sensibilidade do LOFAR. Crédito: Tim Shimwell e equipe LoFAR Surveys.

Os mapas produzidos pelo LOFAR, como os exemplos nas Figuras 2.5 e 2.6, evidenciam sua sensibilidade a fontes fracas e emissão estendida. A evolução do processamento de dados permitiu ao LOFAR produzir mapas com resolução da ordem de $\sim 5\text{-}6''$ a partir de integrações de ordem de várias horas, atingindo ruídos térmicos muito baixos e revelando detalhes de estruturas estendidas em galáxias e aglomerados. Essas melhorias foram fundamentais para os levantamentos profundo/extragalácticos do LOFAR e para os avanços em estudos de polarização e envelhecimento espectral. Além disso, há projetos de expansão em andamento, indicando que esses planos de aprimoramento e consolidação institucional para a próxima década manterão o instrumento competitivo, complementando outras instalações de grande porte.

As figuras e descrições acima contextualizam o instrumento; na subseção seguinte descrevemos o LoTSS DR2, seus produtos, cobertura e parâmetros de catálogo.

2.2.2 Levantamento LoTSS DR2

As figuras ilustrativas da configuração do LOFAR e exemplos de mapas foram agrupadas na Seção 2.2.1 para separar a descrição do instrumento da descrição do produto do levantamento.

O LOFAR Two-metre Sky Survey Data Release 2 (LoTSS DR2) fornece mapas de intensidade total (Stokes I) na faixa de 120–168 MHz cobrindo 27% do céu do hemisfério norte, distribuídos em duas regiões centrais próximas a R.A. $12^{\text{h}}45^{\text{m}}$, Dec $+44^{\circ}30'$ (4178 deg^2) e R.A. $1^{\text{h}}00^{\text{m}}$, Dec $+28^{\circ}00'$ (1457 deg^2) (Shimwell *et al.*, 2022). Uma visualização da cobertura do LoTSS DR2 é mostrada na Figura 2.7.

Os dados são provenientes de 3451 h de observação com a antena de alta banda do LOFAR (7,6 Peta-bytes), calibrados automaticamente para efeitos instrumentais e ionosféricos dependentes da direção. Os mapas de contínuo em Stokes I têm resolução de $6''$, sensibilidade mediana de $83 \mu\text{Jy beam}^{-1}$, precisão de escala de fluxo de $\sim 10\%$, exatidão astrométrica de $0.2''$ e completude de 90% para fontes pontuais com pico de $0.8 \text{ mJy beam}^{-1}$. A catalogação resultou em 4.396.228 fontes, muitas detectadas pela primeira vez em rádio. Imagens de banda dividida em três sub-bandas de 16 MHz permitem estimar índices espectrais in-band com erro típico $|\Delta\alpha| \gtrsim 0.2$. As imagens em Stokes I foram produzidas em três sub-bandas de 16 MHz, o que possibilita estimar índices espectrais dentro da própria observação. A incerteza típica desses índices é $|\Delta\alpha| \gtrsim 0.2$, ou seja, apenas variações relativamente grandes no espectro são confiáveis nessa medição local. As imagens de polarização circular (Stokes V) alcançam sensibilidade de $\sim 95 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ a $20''$, enquanto o *leakage* (vazamento da intensidade total para os mapas de polarização) é muito pequeno, da ordem de 10^{-4} – 10^{-3} . Os cubos de polarização linear (Stokes Q e U) apresentam alta resolução em frequência (480 planos de 97.6 kHz) permitindo análises de rotação de Faraday, embora a sensibilidade por canal seja menor do que a sensibilidade integrada; por isso é comum combinar canais para detectar sinais polares fracos. Em termos práticos, LoTSS oferece capacidade para medir variações espectrais dentro da própria observação e estudar polarização com boa resolução em frequência, mas detecções sutis exigem tratamentos cuidadosos de sensibilidade e de correção de *leakage*. Além das imagens, são disponibilizados publicamente os dados calibrados de visibilidades no espaço uv (medidas complexas de amplitude e fase entre pares de antenas), permitindo reprocessamento, reconstrução de imagens com diferentes resoluções e calibração adicional.

LoTSS DR2 é o levantamento chave deste trabalho para detectar emissão de baixo brilho superficial e lóbulos remanescentes. Sua combinação de sensibilidade superficial, boa resolução ($6''$) e ampla cobertura o torna ideal para identificar emissão difusa e estruturas remanescentes que simplesmente não aparecem em levantamentos com frequências mais altas (GHz) de alta resolução e menor sensibilidade a grandes escalas.

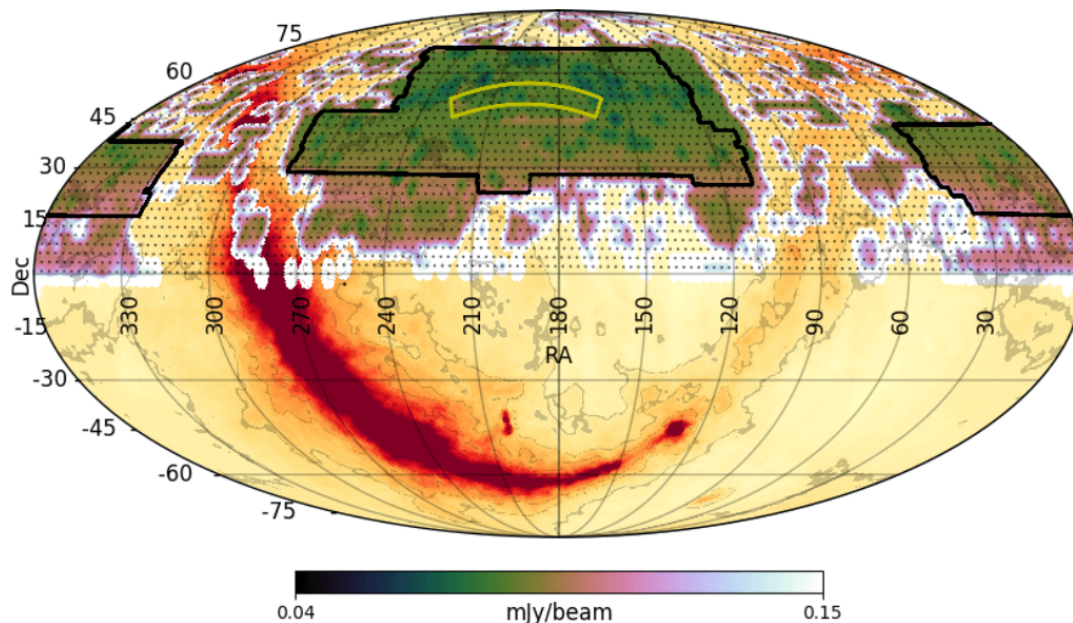


Figura 2.7: Cobertura e sensibilidade aproximada do LoTSS sobreposta ao mapa *all-sky* de Haslam et al. (408 MHz). O fundo em cores mostra a intensidade do mapa de Haslam; o contorno preto delimita a área do LoTSS-DR2 e o contorno amarelo indica a área do LoTSS-DR1. A imagem é adaptada de Shimwell et al. (2022).

2.2.3 Levantamento 7C

O levantamento 7C utilizou o Cambridge Low Frequency Synthesis Telescope (CLFST) a 151 MHz, oferecendo resolução de $70 \times 70 \text{ csc}(\delta) \text{ arcsec}^2$ (Hales et al., 2007; Rees, 1990). Embora o CLFST também opere a 38 MHz, o catálogo 7C concentra-se nos dados a 151 MHz cujos procedimentos iniciais foram descritos por McGilchrist et al. (1990). A extração de fontes empregou o método de *beam-set* de Waldram & McGilchrist (1990) para corrigir a distorção do feixe sintetizado devido à inclinação de 3° nas linhas de base, e posteriormente esse algoritmo foi aprimorado e automatizado para a determinação de fluxos integrados (Waldram & Riley, 1993). O catálogo final reúne cerca de 100 campos de observação, cada um com área típica de $7.3 \times 7.3 \text{ csc}(\delta) \text{ deg}^2$ (ou $7.3 \times 11.0 \text{ csc}(\delta) \text{ deg}^2$ para declinações acima de 50°), totalizando aproximadamente ~ 5000 graus quadrados de cobertura no hemisfério norte. Os dados estão disponíveis em ASCII, acompanhados de arquivos *ReadMe* que informam cobertura, ruído médio, fonte mais fraca e limite de completude (Lacy et al., 1995; Pooley et al., 1998; Riley et al., 1999; Visser et al., 1995).

O 7C, apesar de resolução mais baixa que LoTSS, atua como uma importante verificação independente em baixas frequências e fornece sensibilidade a estruturas muito ampliadas graças ao seu feixe maior. Para fontes muito estendidas ou quando há suspeita de emissão de escala angular superior à capacidade de resolução do LoTSS (dependendo da configuração de array), o 7C ajuda a confirmar fluxos integrados e a detectar estruturas que podem ser resolvidas em LoTSS mas com perdas de fluxo. Em resumo: 7C complementa LoTSS fornecendo um ponto de verificação de grande escala e cobertura

histórica.

2.2.4 Levantamento WENSS

O *Westerbork Northern Sky Survey* (WENSS) é um levantamento de rádio em baixas frequências conduzido com o *Westerbork Synthesis Radio Telescope* (WSRT), cobrindo toda a região do céu ao norte de $\delta = +30^\circ$ a 330 MHz até um limite de sensibilidade de aproximadamente 18 mJy (5σ) (de Bruyn *et al.*, 1998; Rengelink *et al.*, 1997). A resolução espacial dos mapas é de $54'' \times 54'' \csc(\delta)$, com precisão posicional de cerca de $1.5''$ para fontes fortes. Para mapear áreas extensas o WENSS utilizou uma estratégia de *mosaicing*: a grade típica de mosaico contém cerca de 80 apontamentos cobrindo $\sim 100 \text{ deg}^2$, e cada apontamento é observado intermitentemente com integrações de 20 s (com tempo de slew da ordem de 10 s) ao longo de uma síntese padrão de 12 h. Esse modo de observação resulta em aproximadamente 18 *spokes* por campo por síntese de 12 h; para as observações a 92 cm combinaram-se seis configurações de separação entre antenas, totalizando $6 \times 12 \text{ h} = 72 \text{ h}$ de dados por bloco/mosaico e assegurando uma amostragem radial adequada no plano *uv*. O produto final consiste em quadros de $6^\circ \times 6^\circ$ centrados na malha POSS, com mapas gerados em diferentes resoluções ($1'$, $2.5'$ e $4'$) e todos os parâmetros de Stokes (I, Q, U e V), permitindo medições precisas de índices espectrais e propriedades de polarização. O catálogo principal contém cerca de 300 000 fontes a 330 MHz, disponibilizado em formato ASCII juntamente com arquivos ReadMe que descrevem cobertura, ruído médio, limite de completude e características de cada campo.

O WENSS fornece um ponto intermediário de frequência entre LoTSS (144 MHz) e levantamentos GHz, sendo particularmente útil para caracterizar a forma do espectro na transição entre regimes dominados por elétrons de diferentes energias. Sua cobertura e produtos de polarização facilitam a verificação de índices espectrais e a detecção de quebras ou curvas que indiquem envelhecimento espectral (*spectral ageing*). Em termos práticos, WENSS ajuda a preencher lacunas de frequência quando a amostra necessita de medidas em uma faixa inferior a GHz.

2.2.5 Levantamento Texas

O Texas Survey fez mapeamento de fontes de rádio no intervalo de declinação $-35.5^\circ < \delta < +71.5^\circ$ a 365 MHz utilizando o Texas Interferometer entre 1974 e 1983. As posições das fontes têm precisão interna de $\sim 1''$ e as densidades de fluxo para fontes pontuais fortes apresentam erro interno de $\sim 1\%$ (erro total $\sim 5\%$) (Douglas *et al.*, 1996). O catálogo lista 66841 fontes, sendo 90% completo a 0,4 Jy e 80% completo a 0,25 Jy, com indicadores de estrutura simplificada e variabilidade espectral para cada objeto. A montagem do catálogo envolveu análise de 10 faixas de declinação, segmentadas em subfaixas, e flags de qualidade que assinalam a confiabilidade do ajuste de modelo e a probabilidade de

deslocamento de lóbulos.

O catálogo Texas fornece medidas históricas em ~ 365 MHz que são valiosas para construir SEDs com maior comprimento de base em frequência. Apesar de sua limitação de sensibilidade relativa a levantamentos modernos, os valores de fluxo do Texas são úteis para avaliar variação de longo prazo (variabilidade secular) e para conferir a consistência de fluxos integrados em fontes brilhantes. Em estudos de aging e evolução espectral, pontos de catálogo históricos podem ser determinantes para identificar desvios causados por variabilidade ou calibração.

2.2.6 Levantamento FIRST

O projeto FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters) realizou mapeamento de aproximadamente 10000 deg^2 das regiões dos polos galácticos utilizando o Very Large Array (VLA) a 1,4 GHz, alcançando sensibilidade média de $0,15 \text{ mJy beam}^{-1}$ e resolução angular de $\sim 5''$ com pixels de $1.8''$ (Helfand *et al.*, 2015). A versão final do catálogo, resultante de observações entre 1993 e 2011, lista 946432 fontes, com limiar de detecção típico de 1 mJy, exceto em uma faixa equatorial (RA = 21.3–3.3h, Dec = -1° – $+1^\circ$) onde, pela combinação de duas épocas, o limite chega a 0,75 mJy, incluindo cerca de 4500 fontes mais fracas. Imagens obtidas na configuração EVLA foram reprocessadas com limiares de CLEAN menos profundos para reduzir vieses de limpeza, e não foram co-adicionadas às antigas para evitar inconsistências de ruído e frequência.

O EVLA refere-se ao *Expanded Very Large Array*, o programa de modernização do VLA (atualmente designado Karl G. Jansky VLA ou JVLA) que aumentou substancialmente a largura de banda de ~ 100 MHz para até 8 GHz (um ganho de quase duas ordens de magnitude), aumentando a sensibilidade em um fator de ~ 10 e a capacidade de calibração do interferômetro. Observações realizadas com o EVLA tipicamente apresentam menor ruído térmico e maior cobertura espectral do que as observações efetuadas com a configuração original do VLA. Por esse motivo, quando mapas obtidos com o EVLA estavam disponíveis para os campos do FIRST, eles foram reprocessados com parâmetros de deconvolução menos profundos e não foram combinados às imagens antigas do VLA, de modo a evitar inconsistências de ruído e resposta espectral entre os conjuntos de dados (Perley *et al.*, 2011).

O FIRST é crucial para identificar componentes compactas e núcleos resolvíveis a 1.4 GHz graças à sua combinação de sensibilidade e resolução ($\sim 5''$). No contexto deste trabalho, FIRST serve para: (i) localizar com precisão o núcleo compacto que pode corresponder ao pico em SEDs de GPS/CSS; (ii) comparar a morfologia em 1.4 GHz com 144 MHz para identificar emissão compacta versus difusa; e (iii) avaliar índices espectrais de núcleo vs lóbulos quando combinada com LoTSS e VLASS. Além disso, FIRST é um ótimo levantamento usado como referência para a contrapartida astrométrica e parâmetro

de seleção de amostra. [McMahon *et al.* \(2002\)](#)

2.2.7 Levantamento NVSS

O NRAO VLA Sky Survey (NVSS) é um levantamento de rádio a 1,4 GHz que cobre todo o céu ao norte de $\delta = -40^\circ$, mapeando aproximadamente 82% do hemisfério norte em 2326 “cubos” de $4^\circ \times 4^\circ$ contendo imagens de Stokes I, Q e U, além de um catálogo com quase 2 milhões de fontes com fluxos superiores a 2,5 mJy ([Condon *et al.*, 1998](#)). As imagens possuem resolução angular de 45" (FWHM) e sensibilidade uniforme, com ruído típico de 0.45 mJy beam⁻¹ em intensidade total e 0.29 mJy beam⁻¹ em polarização, e precisão posicional que varia de $\lesssim 1''$ para fontes com $S_{1.4\text{GHz}} > 15\text{mJy}$ até $\sim 7''$ no limite do levantamento. A cobertura extensa e a alta sensibilidade do NVSS permitem a detecção de componentes estendidas em escalas de dezenas a centenas de kpc, essencial para identificar lóbulos relictos não visíveis em levantamentos de maior resolução mas menor sensibilidade a estruturas de baixo brilho superficial.

NVSS é um complemento obrigatório quando se busca recuperar fluxo integrado de estruturas estendidas: sua resolução mais baixa e sensibilidade a grandes escalas asseguram que fluxos difusos não sejam “resolvidos para fora”— isto é, filtrados pelo interferômetro devido à ausência de linhas de base curtas sensíveis a estruturas angulares amplas — como pode ocorrer em levantamentos de maior resolução, como o FIRST ou o VLASS. Para a verificação da presença de halos/lóbulos remanescentes em objetos classificados como compactos, o NVSS fornece um teste de robustez para fluxos integrados e morfologia em escalas amplas.

2.2.8 Levantamento VLASS

O Very Large Array Sky Survey (VLASS) realiza o mapeamento de todo o céu ao norte de $\delta = -40^\circ$ na banda S (2–4 GHz) com resolução de 2.5", a maior de qualquer levantamento de rádio-contínuo all-sky até hoje ([Gordon *et al.*, 2021](#)). Na primeira época de observação (“Quick Look Epoch 1”), foram obtidas imagens que permitiram a compilação de um catálogo de $\sim 1.9 \times 10^6$ componentes rádio confiáveis, embora com subestimação média dos fluxos em $\sim 15\%$ para $S > 3\text{mJy beam}^{-1}$ devido às limitações de calibração rápida. A acurácia astrométrica típica é de $\sim 0.25''$, e o catálogo inclui atributos de forma (eixo maior, menor e posição), fluxos de pico e integrados, bem como flags de qualidade que permitem isolar a amostra principal para análises estatísticas. Comparações sistemáticas com FIRST e LoTSS revelaram um índice espectral médio $\alpha_{1.4-3\text{GHz}} \approx -0.71$, e a alta resolução do VLASS evidenciou quebra de componentes em cerca de 18% dos núcleos ativos identificados originalmente como fonte única em FIRST.

VLASS é a ferramenta para estudar componentes muito compactas e variações estruturais finas no núcleo: sua resolução (2.5") permite separar núcleos, jetos e hotspots

próximos ao núcleo que seriam confundidos em NVSS. No entanto, por sua resolução e estratégia de levantamento, VLASS é menos sensível a estruturas de baixa superfície de brilho; por isso é usado em sinergia com LoTSS e NVSS para identificar contraste compacto/difuso. Em particular, detectar uma fonte pontual em VLASS e extensa em LoTSS é um forte indício de reinício de atividade.

2.2.9 Levantamento GB6

O catálogo GB6 foi elaborado a partir dos mapas do levantamento de 4,85 GHz (comprimento de onda de ~ 6 cm) obtidos com o receptor de sete feixes do radiotelescópio de 91 m em Green Bank durante novembro de 1986 a outubro de 1987. O catálogo final inclui 75162 fontes discretas com densidades de fluxo $S_{4.85 \text{ GHz}} \geq 18$ mJy e tamanhos angulares $\phi \leq 10.5'$ (Gregory *et al.*, 1996). Em relação ao catálogo anterior de 87GB, o GB6 apresenta erros de posição e ruído quase $\sqrt{2}$ menores, garantindo maior confiabilidade nos fluxos e nas contagens diferenciais ponderadas $S^{5/2}n(S)$ entre 18 mJy e 7 Jy. As posições estão disponíveis tanto no referencial B1950 quanto J2000, e *flags* indicam fontes na borda de campo, extensão significativa, advertências de fonte fraca e confusões próximas a objetos mais brilhantes.

O GB6 fornece o ponto em alta frequência para a construção das SEDs deste trabalho e é especialmente útil para identificar a inclinação do espectro nas bandas GHz e verificar a presença de componentes com espectro invertido (jatos compactos) ou amortecimento (*quenching*) em altas frequências. Em combinação com VLASS e FIRST, o GB6 contribui para avaliar a curvatura espectral em frequências mais elevadas, o que é importante para separar fontes GPS e HFP (*high frequency peakers*) de fontes com espectro mais envelhecido.

2.2.10 Considerações de calibração e limitações

Além das características dos levantamentos individuais, é crucial explicitar os cuidados metodológicos que justificam a escolha dos conjuntos de dados e que condicionam as análises apresentadas nos capítulos de resultados:

- **Escala de fluxo:** diferentes levantamentos adotam escalas de fluxo ou procedimentos de calibração distintos. Antes de combinar fluxos para SEDs, é necessário homogeneizar as escalas de fluxo e quantificar a incerteza adicional introduzida por deslocamentos de escala sistemáticos.
- **Resolução e perda de fluxo:** levantamentos de alta resolução (VLASS, FIRST) podem resolver estruturas e, assim, subestimar o fluxo integrado de componentes estendidas. Levantamentos de baixa resolução (NVSS, 7C) recuperam melhor o

fluxo integrado mas não resolvem componentes nucleares. A estratégia do trabalho é combinar ambos os regimes para uma resolução comum para medições comparáveis.

- **Sensibilidade a brilho superficial vs sensibilidade pontual:** LoTSS e NVSS são mais sensíveis a brilho superficial baixo; FIRST e VLASS são mais sensíveis a componentes pontuais. Essa diferença é explorada para identificar núcleos compactos embutidos em halos difusos.
- **Épocas e variabilidade:** os levantamentos não foram realizados simultaneamente. Portanto, diferenças na época de observação podem introduzir variação aparente em SEDs de núcleos variáveis. Pontos discrepantes em SEDs devem ser tratados com cautela.

Tabela 2.1: Principais parâmetros dos levantamentos rádio

Levantamento	ν (MHz)	Feixe Sintetizado (arcsec)	RMS (mJy beam ⁻¹)	Área (deg ²)
LoTSS-DR2	144	6	0.10	5635
7C	151	70	25.0	5580
WENSS	325	54 × 96	3.6	8100
Texas	365	60	100.0	8000
FIRST	1400	5	0.15	10575
NVSS	1400	45	0.45	33800
VLASS	3000	2.5	0.12	33350
GB6	4850	210	3.0	20700

Para feixes elípticos, são fornecidos os tamanhos do semi-eixo maior e menor.

Em suma, como resumido na tabela 2.1, a combinação desses levantamentos constitui um conjunto equilibrado para detectar e caracterizar fontes compactas com possíveis componentes remanescentes. No Capítulo 3 descrevemos em detalhe como estes produtos foram tratados: contrapartida astrométrica entre os levantamentos, correção de escala de fluxo, seleção de componentes para construção das SEDs e critérios morfológicos empregados para identificar emissão estendida em 144 MHz contrastando com morfologias compactas em 1.4 GHz.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, detalhamos a metodologia empregada para reprocessar e analisar a amostra de fontes de rádio compactas, com o objetivo principal de verificar a natureza compacta das fontes de rádio e identificar assinaturas observacionais de reinício de atividade dos jatos. A abordagem foi realizada com o software CASA, que utiliza scripts em Python através da ferramenta *casatasks* para a análise de imagens interferométricas, extração e o ajuste de fluxos e a caracterização espectral. As seções subsequentes descrevem, em ordem sequencial, a seleção da amostra, os passos para o processamento de imagens, fotometria e os critérios morfológicos adotados para classificação e construção das distribuições espectrais de energia.

3.1 Seleção da Amostra

O ponto de partida para este trabalho é o catálogo de 84 fontes de rádio compactas, composto por objetos dos tipos *Compact Steep-Spectrum* (CSS) e *GigaHertz Peaked-Spectrum* (GPS), compilado por Nascimento *et al.* (2022). Conforme detalhado no estudo original, essa amostra foi construída a partir da compilação e análise de diversos catálogos de fontes rádio compactas da literatura (Fanti *et al.*, 1990; Hancock *et al.*, 2010; Jarvis *et al.*, 2019; Jeyakumar, 2016; Kunert *et al.*, 2002; Kunert-Bajraszewska & Labiano, 2010; Peck & Taylor, 2000; Snellen *et al.*, 1998, 2004; Son *et al.*, 2012; Spencer *et al.*, 1989; Stanghellini *et al.*, 1998; Tengstrand *et al.*, 2009). O critério de seleção nestes catálogos originais era a presença de um espectro rádio com pico de *turnover* na região de GigaHertz ou MegaHertz, uma característica típica de fontes jovens e/ou fortemente confinadas.

Inicialmente com 204 objetos selecionados, foi aplicado um critério de seleção destinado a identificar de forma confiável as fontes de rádio como AGNs e a assegurar a existência de contrapartida óptica. Para isso, Nascimento *et al.* realizaram um cruzamento de posições com o catálogo do Sloan Digital Sky Survey (SDSS-DR12, Alam *et al.* 2015). Utilizando um raio de $8''$, o procedimento garantiu que todas as fontes possuíssem uma contrapartida

óptica, restringindo a análise a objetos com *redshift* $z \leq 1$ para assegurar que as linhas de emissão de [O II] $\lambda 3727$ e [Ar III] $\lambda 7136$ estivessem dentro da janela espectral em repouso do SDSS. Este procedimento resultou na identificação de 84 AGNs com espectroscopia óptica confiável.

O presente estudo tem como objetivo principal reavaliar esta amostra de fontes compactas sob uma nova perspectiva morfológica em baixas frequências. Utilizamos a sensibilidade incomparável do levantamento LoTSS DR2 em 144 MHz e sua alta resolução angular ($6''$) para investigar a possível presença de emissão estendida e de baixo brilho superficial, indetectável em levantamentos de frequências mais altas (como FIRST ou VLASS) onde estas fontes originalmente se apresentavam como compactas. A detecção de tal emissão difusa é uma assinatura característica de lóbulos remanescentes de episódios anteriores de atividade do jato, indicando que a fonte pode ser um caso de jato reiniciado e não uma fonte genuinamente jovem.

Para isso, realizamos um cruzamento de posições entre as 84 fontes da amostra óptica original e as imagens e o catálogo do LoTSS DR2, que cobre aproximadamente 27% do céu do hemisfério norte. Este processo resultou em uma amostra final composta por 52 objetos, que constituem a base para todas as análises subsequentes desta dissertação. As 32 fontes excluídas devem-se exclusivamente à sua localização fora da área de cobertura do LoTSS DR2.

A Tabela 3.1 apresenta a amostra de 52 fontes analisadas neste trabalho, listando seus nomes nos respectivos catálogos, as coordenadas de ascensão reta e declinação, o *redshift* associado e o fluxo medido no *LoTSS*.

Tabela 3.1: Descrição da amostra.

Nome	RA	DEC	z	LoTSS (mJy feixe ⁻¹)
B2-0026+34	00:29:14.20	+34:56:32.00	0.52	173.01±1.53
FBQSJ07411	07:41:10.70	+31:12:00.31	0.63	456.42±8.14
B3-0754+40	07:57:56.69	+39:59:36.01	0.07	143.11±1.27
4C+47.27	08:04:13.91	+47:04:43.07	0.51	2305.00±8.99
4C+40.20	08:12:53.13	+40:19:00.09	0.55	3295.35±3.86
2MASXJ0831	08:31:39.81	+46:08:00.75	0.13	27.99±0.26
2MASXJ0834	08:34:11.11	+58:03:21.45	0.09	24.46±0.08
B3-0833+44	08:36:37.83	+44:01:09.43	0.06	310.68±1.69
SDSSJ08382	08:38:25.00	+37:10:37.00	0.40	710.02±2.61
3C213.1	09:01:05.32	+29:01:46.46	0.19	2033.23±32.74
B3-0902+46	09:06:15.52	+46:36:18.98	0.08	76.41±0.16
3C216	09:09:33.50	+42:53:46.54	0.67	19377.28±8.49

Nome	RA	DEC	z	LoTSS (mJy feixe ⁻¹)
SDSS091734	09:17:34.81	+50:16:38.15	0.63	281.17±0.71
FBQSJ09452	09:45:25.88	+35:21:03.46	0.21	784.06±1.07
4C+39.29	10:17:14.18	+39:01:22.79	0.21	3791.45±16.12
2MASXJ1026	10:26:18.27	+45:42:29.45	0.15	71.69±0.25
4C+39.32	10:28:44.30	+38:44:36.67	0.36	2490.63±2.30
SDSSJ10350	10:35:07.06	+56:28:46.82	0.46	638.14±1.29
UGC05771	10:37:19.34	+43:35:15.07	0.02	218.03±0.67
4C+30.19	10:40:29.96	+29:57:57.98	0.09	2114.13±1.46
2MASSJ1056	10:56:28.21	+50:19:52.24	0.82	350.66±1.31
WISEJ111036	11:10:36.31	+48:17:52.54	0.74	324.42±0.70
B3-1128+455	11:31:38.92	+45:14:51.00	0.40	4397.25±5.21
4C+46.23	11:43:39.86	+46:21:23.57	0.12	1729.42±13.87
[HB89]1153	11:56:18.74	+31:28:04.75	0.42	7374.44±8.95
B3-1154+435	11:57:27.60	+43:18:06.77	0.23	1135.66±1.38
B2-1201+39	12:04:06.86	+39:12:18.21	0.44	1517.86±1.72
3C268.3	12:06:24.70	+64:13:37.00	0.37	12157.27±3.77
B3-1206+415	12:09:02.80	+41:15:59.41	0.10	78.89±0.21
B3-1241+411	12:44:19.99	+40:51:37.22	0.25	1036.42±2.24
B3-1242+410	12:44:49.20	+40:48:06.35	0.81	924.95±2.01
4C+49.25	12:47:07.37	+49:00:18.27	0.21	2265.21±2.80
SBS1250+568	12:52:26.32	+56:34:19.65	0.32	8833.98±2.69
B3-1308+451	13:10:56.99	+44:51:46.61	0.39	393.34±1.03
B3-1315+41	13:17:39.21	+41:15:45.98	0.07	5.42±0.20
3C286	13:31:08.28	+30:30:32.95	0.85	20326.19±5.05
4C+62.22	14:00:28.69	+62:10:38.41	0.43	1500.16±1.68
2MASXJ1400	14:00:51.62	+52:16:06.61	0.12	392.73±1.51
B3-1402+415	14:04:16.30	+41:17:49.00	0.36	322.88±0.68
MRK0668	14:07:00.39	+28:27:14.78	0.08	73.28±0.31
2MASXiJ140	14:09:42.46	+36:04:16.00	0.15	73.66±0.23
SDSSJ14132	14:13:27.21	+55:05:29.29	0.28	102.48±0.44
B3-1412+461	14:14:14.85	+45:54:48.79	0.19	73.38±0.42
2MASXJ1435	14:35:21.68	+50:51:22.81	0.10	244.22±1.10
B3-1445+410	14:47:12.73	+40:47:45.65	0.20	565.00±2.82
2MASXJ1530	15:30:16.24	+37:58:31.16	0.15	15.99±0.19
B2-1542+39	15:43:49.50	+38:56:01.00	0.55	946.87±1.38
SDSSJ15504	15:50:43.90	+45:36:24.00	0.50	10.77±0.09
2MASSJ1559	15:59:27.66	+53:30:54.66	0.18	1098.67±1.29

Nome	RA	DEC	z	LoTSS (mJy feixe ⁻¹)
4C+52.37	16:02:46.39	+52:43:58.66	0.11	1204.94±0.98
4C+40.34	16:11:48.55	+40:40:20.90	0.15	2567.46±7.97
SDSSJ16431	16:43:11.35	+31:56:18.04	0.59	540.84±0.80

3.2 Common Astronomy Software Applications

O pacote *Common Astronomy Software Applications* (CASA) é a aplicação referência para calibração, formação de imagem e análise de dados de radiointerferometria, sendo amplamente utilizada nas *pipelines* do ALMA e do Karl G. Jansky Very Large Array (VLA). No presente trabalho adotamos a versão CASA 6.6.3.22, que foi utilizada de forma integral para a inspeção visual, medições quantitativas de ruído e fotometria de componentes compactas e extensas.

Os processos empregados no CASA utilizaram tarefas nativas para a condução da análise. A tarefa `imstat` foi utilizada para estimativas estatísticas locais e determinação robusta do ruído de fundo (σ_{rms}) em regiões livres de emissão. A tarefa `imfit` foi utilizada para o ajuste de componentes gaussianas bidimensionais, permitindo a extração de fluxos de pico e integrados. As tarefas `imfit` e `imstat` operam através da especificação explícita de regiões de interesse delimitadas pelo usuário (se não houver delimitação, será considerada toda a imagem).

Para inspeção visual, definição de regiões e análise morfológica empregamos o visualizador `imview` do CASA. O `imview` foi usado para sobrepor imagens em diferentes frequências, ajustar escalas de intensidade e contraste, e gerar contornos em níveis de significância que orientaram a construção das máscaras utilizadas na análise. As regiões de interesse para extração de fluxo e medição do ruído foram definidas no `imview` e salvas em arquivos de região no formato reconhecido pelo CASA; estes arquivos foram então repassados de forma programática para as tarefas `imstat` e `imfit`, garantindo que as estimativas estatísticas e os ajustes gaussianos fossem efetuados exatamente sobre as mesmas áreas visualmente identificadas. O `imview` também permitiu inspecionar resíduos de modelagem, identificar artefatos de imagem e posicionar com precisão as máscaras usadas para integrar o fluxo de estruturas extensas.

Em nosso fluxo de trabalho, o uso do CASA foi empregado de forma manual e por scripts Python que automatizaram a execução sequencial das tarefas, a extração estruturada dos resultados a partir dos logs e o armazenamento dos dados em tabelas padronizadas. Esses scripts incluem rotinas para carregar os arquivos de região gerados com o `imview`, executar `imstat` e `imfit` sobre as mesmas regiões, e consolidar as saídas em arquivos `.csv` e tabelas que serviram de base para as análises estatísticas e os gráficos

apresentados nesta dissertação.

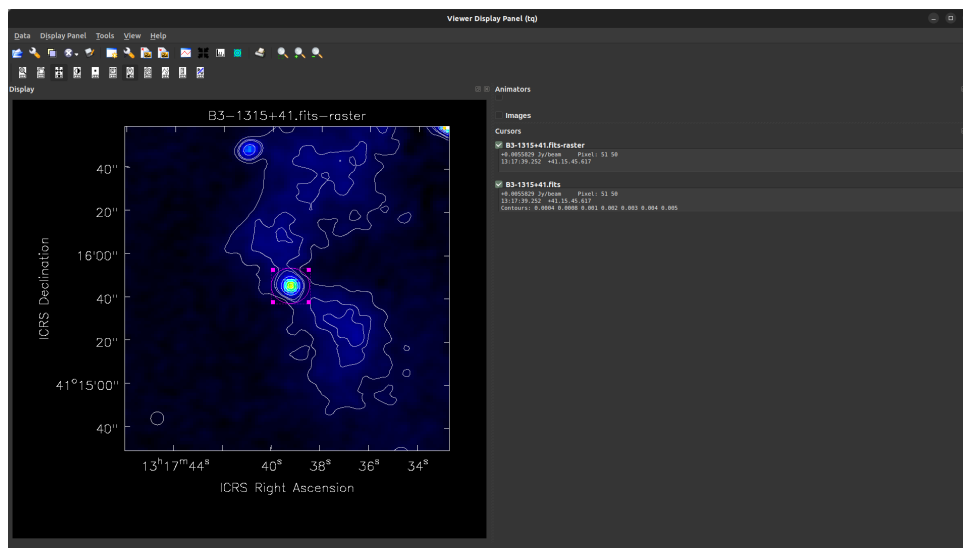


Figura 3.1: Exemplo da interface gráfica `imview` do CASA com uma fonte carregada, contornos sobrepostos e a região usada para medir o núcleo. No painel direito observa-se o valor do pixel selecionado, o valor de fluxo, coordenadas e os níveis de contorno exibidos (em unidade de fluxo por feixe). Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.1 ilustra um exemplo prático do uso da interface `imview` do CASA durante a inspeção visual e definição de regiões. No painel principal observa-se o recorte com os contornos sobrepostos (usados para evidenciar emissão de baixo brilho superficial), enquanto o painel lateral exibe informações de cursor e os níveis de contorno aplicados (valores em unidade de fluxo por feixe). A elipse destacada foi desenhada com a ferramenta *Ellipse Drawing* no menu superior e marca a região usada para ajuste gaussiano e extração de fluxos com a tarefa `imfit`, delimitando a emissão central da fonte (critério adotado de para a construção das SEDs). Esta representação evidencia como a visualização interativa auxilia na identificação de emissão estendida, na implementação precisa de máscaras e na verificação de possíveis artefatos antes da extração quantitativa dos parâmetros.

3.3 Processamento de Imagens e Extração de Fluxo

O processo de análise de imagens e fotometria de rádio foi realizado de forma sistemática para cada uma das 52 fontes da amostra final, utilizando uma combinação integrada do pacote CASA e de scripts personalizados em Python 3.9. Esta integração implementou um fluxo de trabalho que inicia na aquisição dos dados até a extração quantitativa dos parâmetros fotométricos e morfológicos.

3.3.1 Aquisição e tratamento de dados

Para cada fonte, as imagens calibradas no formato FITS foram obtidas através dos serviços de *cutout* dos respectivos levantamentos: *LoTSS DR2* (144 MHz), *FIRST* (1.4

GHz), *NVSS* (1.4GHz) e *VLASS* (3 GHz). Para os levantamentos *7C* (151MHz), *Texas* (365 MHz), *WENSS* (325 MHz) e *GB6* (4.85), que não disponibilizam imagens de alta resolução de forma facilmente acessível, os valores de fluxo integrado foram extraídos diretamente de seus catálogos eletrônicos através de busca por coordenadas com uma tolerância de 5".

A confirmação astrométrica das contrapartidas ópticas foi garantida pela concordância posicional entre as coordenadas do catálogo *SDSS-DR12* e as posições dos picos de emissão em rádio, com tolerância típica inferior a 1". Para a análise comparativa entre levantamentos com diferentes resoluções angulares, utilizou-se a função `reproject_interp` do pacote `astropy` para realizar o alinhamento espacial das imagens, particularmente entre os dados do *LoTSS* e *FIRST*. Este passo garantiu que os contornos de emissão de baixa frequência fossem sobrepostos corretamente às estruturas de alta frequência, sendo crucial para a identificação precisa de estruturas extensas de baixo brilho superficial associadas a episódios anteriores de atividade.

3.3.2 Medição do ruído de fundo

A quantificação do ruído de fundo local (σ_{rms}) foi determinada utilizando a tarefa `imstat` em conjunto com o `imview`. Adotou-se uma estratégia para mitigar a influência de emissão fraca ou artefatos de imagem. Foram selecionadas manualmente quatro regiões retangulares distintas, localizadas em quadrantes opostos da imagem e estrategicamente posicionadas para evitar a emissão da fonte principal e de quaisquer outras fontes evidentes no campo. O valor final de σ_{rms} para cada imagem foi calculado como a média aritmética dos desvios padrão medidos nestas quatro regiões de fundo:

$$\sigma_{\text{rms}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sigma_i \quad (3.1)$$

onde σ_i representa o desvio padrão dos valores de pixel na i -ésima região. Esta abordagem permitiu obter uma estimativa representativa e confiável da sensibilidade local de cada imagem, que foi subsequentemente utilizada para definir limiares de detecção e gerar contornos de significância.

3.3.3 Fotometria de componentes compactas

A caracterização fotométrica dos núcleos compactos foi realizada através da tarefa `imfit` do *CASA*, que ajusta um modelo de Gaussiana bidimensional à emissão da fonte. Para cada levantamento de alta resolução (*FIRST* e *VLASS*), o fluxo de pico (S_{peak}) do núcleo foi a quantidade primária de interesse, uma vez que o objetivo para essas frequências era caracterizar a emissão da região nuclear compacta onde reside o jato jovem ou potencialmente reiniciado.

O processo de fotometria foi automatizado através de scripts Python que iteravam sobre todas as fontes da amostra. Estes scripts executavam o `imfit` para cada imagem disponível, realizando o ajuste de uma única gaussiana bidimensional dentro de uma região circular centrada nas coordenadas do SDSS com um raio de $10''$, suficiente para isolar o núcleo da possível emissão estendida de baixa frequência. A escolha de uma única componente gaussiana foi verificada pela inspeção visual dos resíduos de cada ajuste; quando os resíduos indicavam modelagem incompleta, a fonte era reanalisada individualmente. Os valores de fluxo de pico e suas incertezas estatísticas, fornecidos pelo `imfit`, eram então extraídos sistematicamente dos arquivos de log.

Para garantir a consistência das medidas entre os diferentes levantamentos, todos os valores de fluxo foram mantidos ou convertidos para unidades de mJy beam^{-1} , padronizando assim a análise fotométrica. As incertezas fotométricas finais foram calculadas combinando a incerteza estatística fornecida pelo ajuste do `imfit` com uma estimativa de incerteza sistemática de calibração de fluxo, específica para cada levantamento. Para o LoTSS, FIRST e VLASS, adotou-se um valor conservador de 10% para esta incerteza sistemática (Gordon *et al.*, 2021; Helfand *et al.*, 2015; Shimwell *et al.*, 2022), enquanto para os outros catálogos, as incertezas publicadas foram propagadas.

3.3.4 Análise morfológica e fotometria de estruturas extensas

A análise morfológica das fontes foi realizada primariamente através da inspeção visual sistemática das imagens do *LoTSS DR2*, que oferece a combinação ideal de sensibilidade a baixo brilho superficial e resolução angular adequada para detectar estruturas extensas que possam representar remanescentes de episódios anteriores de atividade.

Para evidenciar quantitativamente a presença de emissão difusa, foram aplicados contornos em múltiplos níveis de significância: 4σ , 10σ , 20σ , 50σ e 100σ , onde σ representa o valor de σ_{rms} com o comando `contour` dentro do `imview` do CASA. Posteriormente, foram sobrepostos os contornos da emissão rádio do *LoTSS* nas imagens do *FIRST* utilizando rotinas de plotagem do `matplotlib` e `astropy`, permitindo uma comparação direta entre a morfologia em baixas e altas frequências.

A presença de emissão estendida em baixas frequências contrastando com uma morfologia compacta em altas frequências foi considerada a assinatura primária de atividade de jato reiniciado. Para quantificar esta emissão extensa, utilizou-se a própria máscara de 4σ para integrar o fluxo total dentro da estrutura visível no *LoTSS*. O fluxo integrado total ($S_{\text{int}, 144\text{MHz}}$) foi calculado pela equação:

$$S_{\text{int}} = \left(\sum_i I_i \right) \frac{\Omega_{\text{pix}}}{\Omega_{\text{beam}}} \quad (3.2)$$

onde I_i representa o valor de intensidade do pixel i em unidades de Jy beam^{-1} , Ω_{pix}

é a área angular do pixel em esterradianos, e Ω_{beam} é a área efetiva do feixe sintetizado, calculada como:

$$\Omega_{\text{beam}} = \frac{\pi}{4 \ln 2} B_{\text{maj}} B_{\text{min}} \quad (3.3)$$

sendo B_{maj} e B_{min} os eixos maior e menor do feixe sintetizado, convertidos para raios. Esta medida permitiu comparar quantitativamente o fluxo total em 144 MHz com o fluxo nuclear medido em 1.4 GHz, fornecendo uma métrica crucial para a classificação das fontes.

3.3.5 Automação e controle de qualidade

Após estabelecer o processo de análise, o processo de obtenção dos dados e a extração dos parâmetros foi meticulosamente automatizado através de uma série de scripts Python. Esta abordagem garantiu a reprodutibilidade integral da análise e a consistência metodológica ao longo de toda a amostra, permitindo a reexecução completa do fluxo de trabalho, caso necessário.

O controle de qualidade foi implementado em múltiplos níveis. Primeiramente, realizou-se uma verificação visual sistemática de todas as imagens e contornos gerados para cada fonte, assegurando que artefatos de imagem ou fontes contaminantes próximas não viesassem a análise. Em segundo lugar, os resíduos dos ajustes realizados pelo `imfit` foram inspecionados detalhadamente para detectar possíveis imperfeições na modelagem da componente compacta. Finalmente, sempre que disponíveis, os fluxos medidos foram validados através de comparação cruzada com valores catalogados publicamente (e.g., catálogos LoTSS DR2, FIRST), assegurando a concordância dentro das incertezas esperadas.

Todos os valores de fluxo extraídos, juntamente com suas incertezas devidamente propagadas e os metadados relevantes (valores de σ_{rms} , parâmetros do feixe sintetizado, *flags* de qualidade), foram compilados em uma tabela em formato `.csv`. Esta tabela foi utilizada como base fundamental para as análises apresentadas no Capítulo 4.

3.4 Classificação Morfológica e Critérios para Identificação de Emissão Estendida

Com base na análise morfológica descrita na Seção 3.3.4, estabelecemos critérios objetivos para classificar cada fonte da amostra em categorias morfológicas. Estes critérios visam identificar fontes que exibem evidências de reinício de atividade. Como exemplo ilustrativo, a Figura 3.2 apresenta um conjunto de fontes altamente resolvidas observadas pelo LoTSS, destacando diferentes morfologias de emissão estendida.

Uma fonte foi classificada como "Estendida" se satisfizesse as seguintes condições:

- Presença de emissão significativa ($\geq 4\sigma_{\text{rms}}$) no *LoTSS* que se estenda espacialmente para além de uma região circular com raio equivalente a duas vezes o tamanho do feixe sintetizado do *FIRST* ($2 \times 5'' = 10''$) centrada na posição do núcleo.
- A morfologia da emissão em 144 MHz deve ser claramente distinta da morfologia em 1.4 GHz (*FIRST*), que deve ser predominantemente compacta (não resolvida ou ligeiramente resolvida).
- A razão de fluxos de pico entre LoTSS e 7C, $S_{\text{peak}, 144\text{MHz}}/S_{\text{peak}, 151\text{MHz}}$, deve ser superior a 1.5. Essa diferença reflete a maior sensibilidade do 7C a estruturas extensas e difusas, uma vez que sua resolução angular é significativamente inferior à do LoTSS. Assim, o feixe mais largo do 7C integra uma fração maior do fluxo, enquanto o LoTSS resolve parte da emissão difusa, resultando em um fluxo de pico relativamente menor.
- Fontes que exibiam alguma extensão de baixa significância (3σ a 4σ) ou cuja morfologia era ambígua foram classificadas como "Candidatas a Emissão Estendida" e foram alvo de inspeção visual ainda mais criteriosa. Fontes que não mostraram qualquer extensão detectável acima do limiar de 3σ foram classificadas como "Compactas".

Esta classificação forma a estrutura da análise dos resultados, permitindo uma quantificação estatística da fração de fontes reiniciadas na amostra original de GPS/CSS.

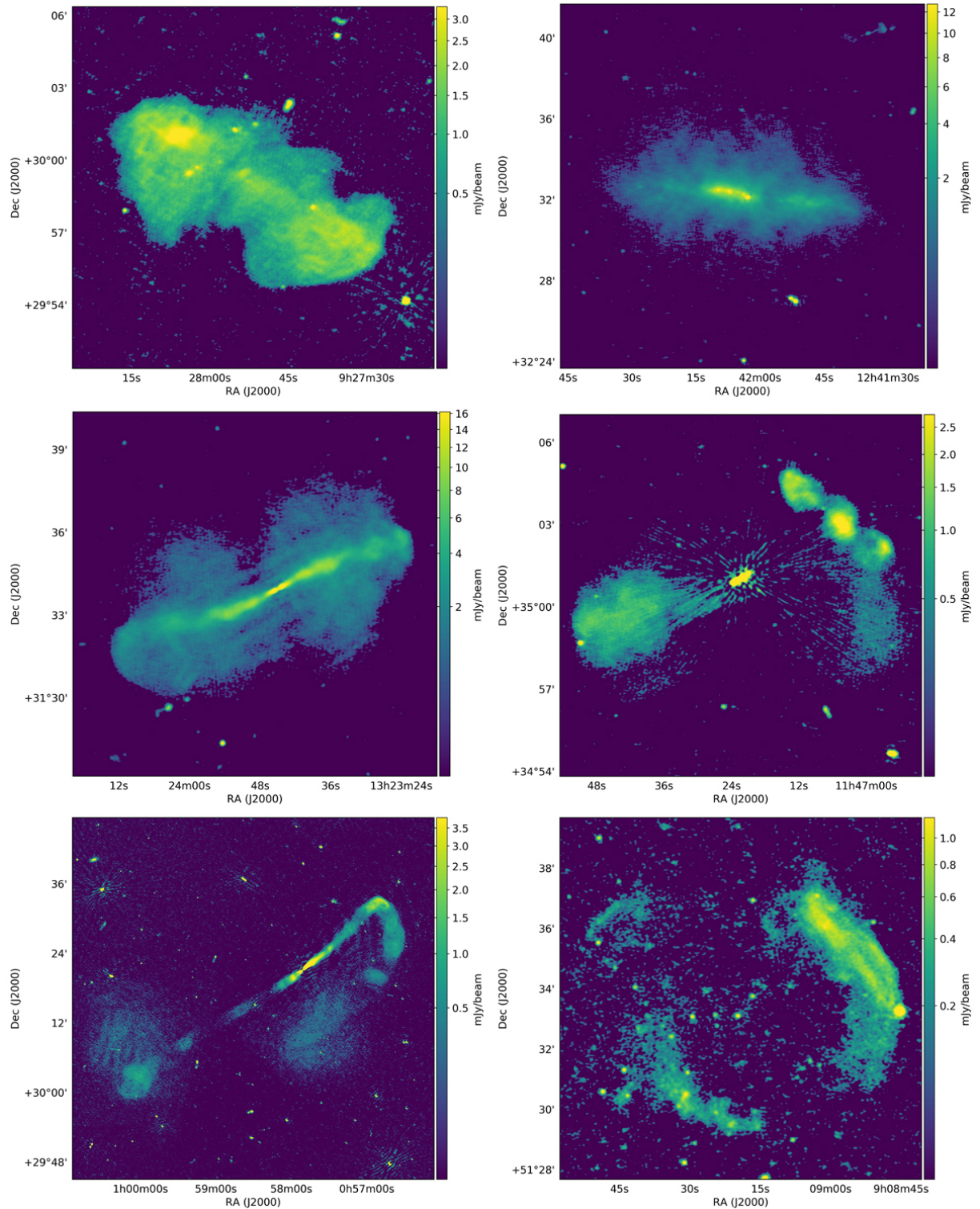


Figura 3.2: Imagens do LoTSS DR2 de uma seleção de fontes altamente resolvidas. Sentido horário a partir do canto superior esquerdo: B2 0924+30; NGC 4631; B2 1144+35B; Abell 746; NGC 315; B2 1321+31. Fonte: [Shimwell *et al.* \(2022\)](#).

3.5 Construção e Análise das Distribuições Espectrais de Energia

Para cada fonte, uma SED foi construída utilizando os valores de fluxo extraídos das múltiplas frequências dos levantamentos utilizados.

O índice espectral α é a medida da inclinação da emissão síncrotron e é definido pela relação

$$S_\nu \propto \nu^\alpha, \quad (3.4)$$

onde S_ν é o fluxo específico na frequência ν . Na prática, quando se dispõe de medidas em duas frequências ν_1 e ν_2 , o índice é estimado por

$$\alpha = \frac{\log(S_{\nu_2}/S_{\nu_1})}{\log(\nu_2/\nu_1)}. \quad (3.5)$$

Neste trabalho adotamos como métrica o índice $\alpha_{144\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}}$, obtido entre LoTSS (144 MHz) e FIRST (1.4 GHz),

$$\alpha_{144\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}} = \frac{\log(S_{1.4\text{GHz}}/S_{144\text{MHz}})}{\log(1.4\text{GHz}/144\text{MHz})}. \quad (3.6)$$

O índice espectral foi calculado entre esses dois levantamentos devido às duas bandas caracterizarem populações de elétrons diferentes, com 144 MHz sendo mais sensível a elétrons de menor energia e emissão remanescente e 1.4 GHz refletindo a emissão nuclear de jatos jovens e confinados; e principalmente devido ao LoTSS e FIRST apresentarem alta resolução angular comparável (6" e 5"), permitindo a amostragem do mesmo volume físico na maioria das fontes.

O objetivo é caracterizar a forma espectral da emissão síncrotron, com foco particular na identificação e localização do pico espectral, uma característica que define a transição dos jatos entre regimes confinados e densos (GPS) para um regime opticamente fino (CSS).

O ajuste das SEDs foi realizado no espaço $\log \nu - \log S_\nu$, adequado para modelar a emissão síncrotron que segue uma lei de potência. Adotamos um modelo polinomial de segunda ordem para capturar e modelar a curvatura no espectro, particularmente o pico em baixas frequências:

$$\log S_\nu = a (\log \nu)^2 + b \log \nu + c. \quad (3.7)$$

Os parâmetros a , b e c foram determinados utilizando o método de mínimos quadrados implementado na função `numpy.polyfit`. A frequência de pico observada ($\nu_{t,\text{obs}}$) é então encontrada calculando o vértice da parábola:

$$\log \nu_{t,\text{obs}} = -\frac{b}{2a}. \quad (3.8)$$

O fluxo de pico correspondente é obtido pela avaliação da Equação 3.7 neste valor de

$\log \nu$. Definimos a frequência de pico observada como $\nu_{t,obs}$, enquanto $\nu_{t,rest}$ corresponde à frequência de pico no referencial de repouso da fonte. Esta última é obtida a partir da correção cosmológica de dilatação temporal:

$$\nu_{t,rest} = \nu_{t,obs} (1 + z). \quad (3.9)$$

A incerteza em $\nu_{t,rest}$ foi estimada através de propagação de erro padrão, considerando a matriz de covariância do ajuste polinomial e a incerteza no *redshift*.

Todo o processo de construção da SED, ajuste do modelo, cálculo dos parâmetros e plotagem foi implementado em Python, utilizando as bibliotecas `numpy`, `astropy`, `scipy` e `matplotlib`. As SEDs resultantes foram agrupadas de acordo com a classificação morfológica estabelecida na Seção 3.4, permitindo a busca por tendências sistemáticas entre a morfologia em baixa frequência e a forma espectral global. A figura 3.3 apresenta um exemplo didático que ilustra a diferença entre as duas configurações espectrais recorrentes nas SEDs das fontes estudadas. No painel esquerdo a presença de um pico em frequências relativamente altas indica um núcleo compacto com forte autoabsorção, interpretação compatível com jatos muito jovens ou fortemente confinados. No painel direito o espectro não mostra um pico no intervalo observado e apresenta uma inclinação contínua, característica de uma população de elétrons envelhecida dominando a emissão, como em lóbulos remanescentes. Este exemplo serve como referência visual para a leitura das SEDs que serão discutidas na seção de resultados.

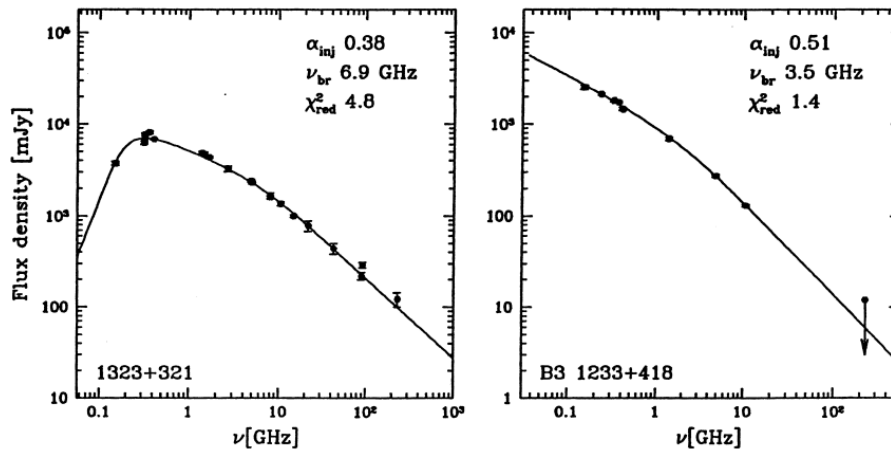


Figura 3.3: Comparação ilustrativa de duas distribuições espectrais de energia. Painel esquerdo: SED com pico típico de fontes CSS/GPS. Painel direito: SED sem pico evidente, comportamento associado a uma população de elétrons mais envelhecida, típico de jatos “adultos” presentes em fontes Fanaroff–Riley. Fonte: (Murgia *et al.*, 2002).

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo, apresentamos os resultados obtidos a partir da análise da amostra final de 52 fontes, selecionadas a partir do catálogo original de 84 objetos previamente classificados como CSS/GPS. Utilizando dados multifrequência, com ênfase nas imagens de baixa frequência do *LoTSS*, buscamos identificar assinaturas de reinício de atividade dos jatos através da detecção de emissão estendida de baixo brilho superficial. Os resultados são organizados em três eixos principais: (i) classificação morfológica com base na presença de emissão estendida; (ii) características espectrais e determinação do turnover; e (iii) análise individual de fontes peculiares ou representativas.

4.1 Características Espectrais

A Tabela 4.1 apresenta a classificação espectral das 52 fontes analisadas, com seus índices espectrais entre 144 MHz e 1.4 GHz ($\alpha_{144\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}}$) e as frequências de turnover observadas e em repouso. Os valores de fluxo em múltiplas frequências, utilizados para a construção das distribuições espectrais de energia e determinação do turnover, são apresentados em detalhe no Apêndice A.

Tabela 4.1: Classificação espectral das fontes analisadas.

ID	Nome	$\alpha_{144\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}}$	Turnover (MHz)		Classificação
			Observado	Repouso	
1	B2-0026+34	–	1180	1793	GPS
2	FBQSJ07411	0.67	1284	2093	GPS
3	B3-0754+40	-0.17	342	366	CSS
4	4C+47.27	-0.45	–	–	F
5	4C+40.20	-0.51	–	–	F
6	2MASXJ0831	0.67	1201	1358	GPS
7	2MASXJ0834	0.33	758	827	GPS

Tabela 4.1 – Continuação

ID	Nome	$\alpha_{144\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}}$	Turnover (MHz)		Classificação
			Observado	Repouso	
8	B3-0833+44	-0.38	–	–	F
9	SDSSJ08382	-0.28	238	333	CSS
10	3C213.1	-0.46	372	443	CSS
11	B3-0902+46	0.62	841	909	GPS
12	3C216	-0.77	–	–	F
13	SDSS091734	-0.45	–	–	F
14	FBQSJ09452	-0.77	–	–	F
15	4C+39.29	-0.56	176	213	CSS
16	2MASXJ1026	0.15	959	1102	GPS
17	4C+39.32	-0.61	–	–	F
18	SDSSJ10350	0.45	1014	1480	GPS
19	UGC05771	-0.25	–	–	F
20	4C+30.19	-0.79	–	–	F
21	2MASSJ1056	-0.67	–	–	F
22	WISEJ111036	0.21	601	1046	GPS
23	B3-1128+455	-0.36	233	326	CSS
24	4C+46.23	-0.75	365	409	CSS
25	[HB89]1153	-0.43	189	268	CSS
26	B3-1154+435	-0.68	–	–	F
27	B2-1201+39	-0.56	153	220	CSS
28	3C268.3	–	148	203	CSS
29	B3-1206+415	0.27	893	983	GPS
30	B3-1241+411	-0.49	–	–	F
31	B3-1242+410	0.16	533	965	GPS
32	4C+49.25	-0.35	192	233	CSS
33	SBS1250+568	-0.61	–	–	F
34	B3-1308+451	-0.63	–	–	F
35	B3-1315+41	2.57	1908	2042	GPS
36	3C286	-0.14	372	689	GPS
37	4C+62.22	0.47	701	1003	GPS
38	2MASXJ1400	-0.38	–	–	F
39	B3-1402+415	-0.19	243	330	CSS
40	MRK0668	1.08	–	–	HFP
41	2MASXiJ140	0.29	662	761	GPS
42	SDSSJ14132	0.09	506	647	GPS

Tabela 4.1 – Continuação

ID	Nome	$\alpha_{144\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}}$	Turnover (MHz)		Classificação
			Observado	Repouso	
43	B3-1412+461	0.76	1079	1284	GPS
44	2MASXJ1435	-0.26	176	193	CSS
45	B3-1445+410	-0.68	383	460	CSS
46	2MASXJ1530	0.81	3476	3997	GPS
47	B2-1542+39	-0.72	–	–	F
48	SDSSJ15504	0.71	–	–	HFP
49	2MASSJ1559	-0.83	–	–	F
50	4C+52.37	-0.35	189	210	CSS
51	4C+40.34	-0.69	–	–	F
52	SDSSJ16431	-0.70	–	–	F

Legenda:GPS: Espectro com pico em GHz (*Gigahertz Peaked Spectrum*)HFP: Espectro com pico em altas frequências (*High Frequency Peaker*)CSS: Espectro com pico em MHz (*Compact Steep Spectrum*)F: Espectro plano/achatado em baixas frequências (*Flat/Flattening at low frequencies*)

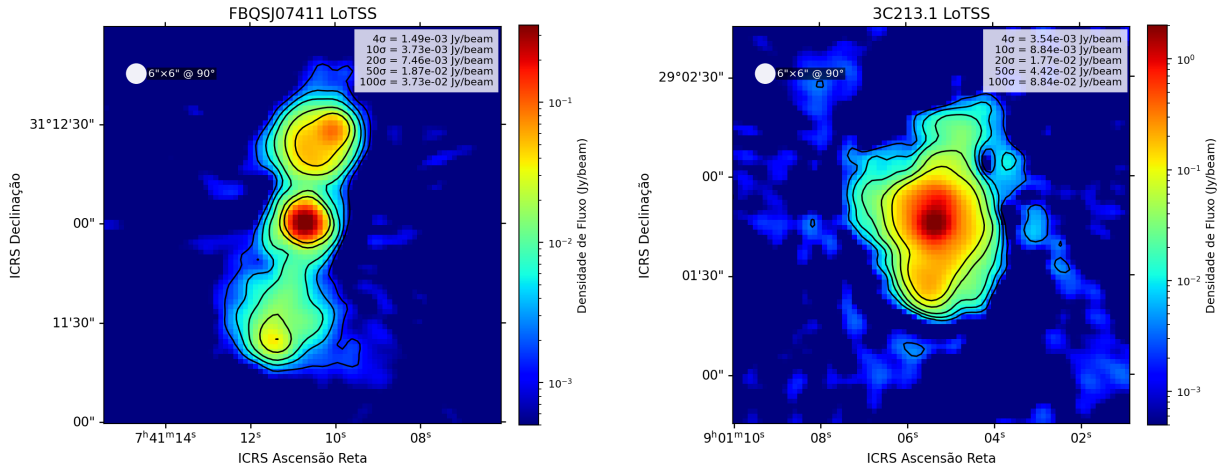
Com base na análise dos índices espectrais $\alpha_{144\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}}$ apresentados na Tabela 4.1, observa-se uma diversidade significativa nas propriedades espectrais dos núcleos compactos da amostra. A distribuição dos índices revela que aproximadamente 23% das fontes (12 objetos) apresentam espectros invertidos ($\alpha > 0$), característicos de fontes GPS/HFP muito jovens com picos espectrais típicos acima de 500 MHz. Cerca de 42% das fontes (22 objetos) exibem espectros íngremes ($\alpha < -0,5$), compatíveis com emissão opticamente fina de fontes CSS com picos abaixo de 500 MHz. Os 35% restantes (18 fontes) mostram espectros entre planos e moderadamente íngremes ($-0,5 \leq \alpha \leq 0$) e são classificadas como F (Espectro plano/achatado). Este achatamento espectral em baixas frequências pode ser atribuído a vários mecanismos físicos: para fontes com índices espectrais na faixa de $-0,5$, o espectro achatado pode representar uma injeção elétrons energéticos, antes que os efeitos de envelhecimento por perdas radiativas se tornem dominantes, conforme observado em estudos de populações de elétrons recentemente acelerados (Callingham *et al.*, 2017). Alternativamente, algumas fontes podem exibir um pico espectral em frequências ainda mais baixas (< 150 MHz), não amostradas pelos levantamentos atuais, requerendo observações em bandas abaixo de 50 MHz para confirmação (O’Dea & Saikia, 2021). Em casos mais raros, o achatamento pode indicar um corte na distribuição de energia dos elétrons de baixa energia, possivelmente relacionado a processos de absorção ou limitações

no mecanismo de aceleração de partículas (Turner *et al.*, 2018). Esta diversidade espectral mostra que observações multifrequência, particularmente em bandas de baixa frequência, são fundamentais para esclarecer os mecanismos físicos responsáveis pelas características observadas nestas fontes compactas.

4.2 Análise Espectral e Morfológica das Radiogaláxias

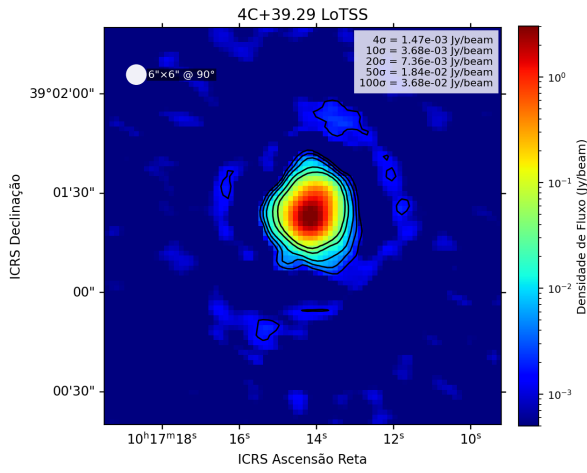
4.2.1 Imagens *LoTSS*

A Figura 4.1 apresenta os recortes *LoTSS* (144 MHz) das fontes identificadas como estendidas na amostra. Nessas imagens nota-se emissão difusa de baixo brilho superficial em todas as fontes, característica compatível com emissão rádio de episódios anteriores de atividade. A seguir descrevemos as propriedades morfológicas e espectrais das fontes apresentadas. É importante lembrar que essas fontes atualmente estão classificadas como fontes compactas, de modo que a sua classificação como fontes estendidas representa uma contribuição inédita desta dissertação.

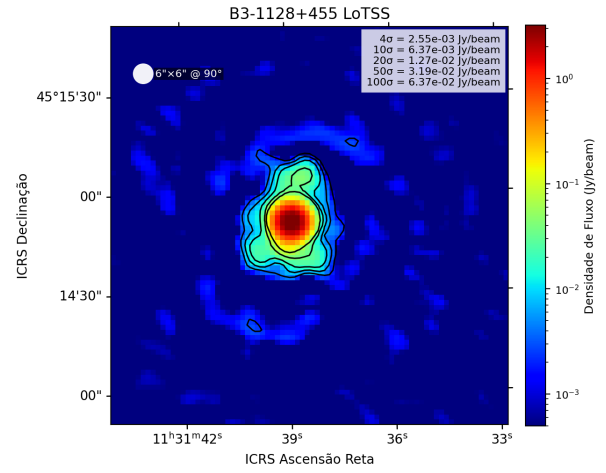


(a) Fonte 2: FBQJ07411

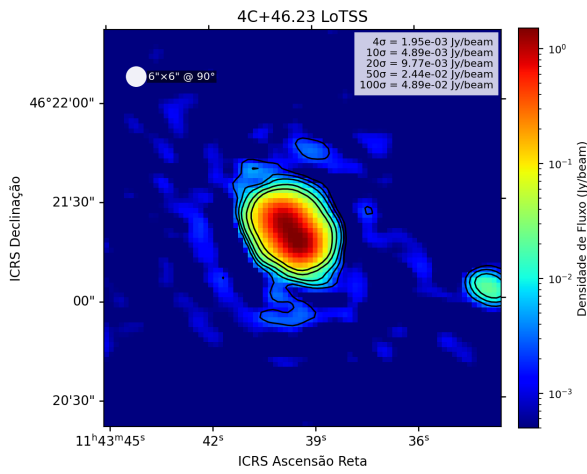
(b) Fonte 10: 3C213.1



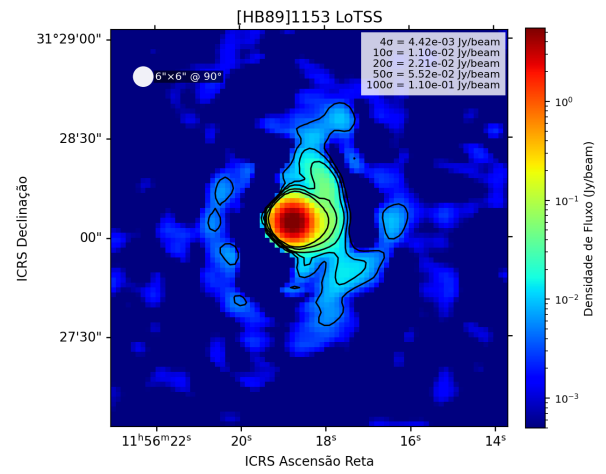
(c) Fonte 15: 4C+39.29



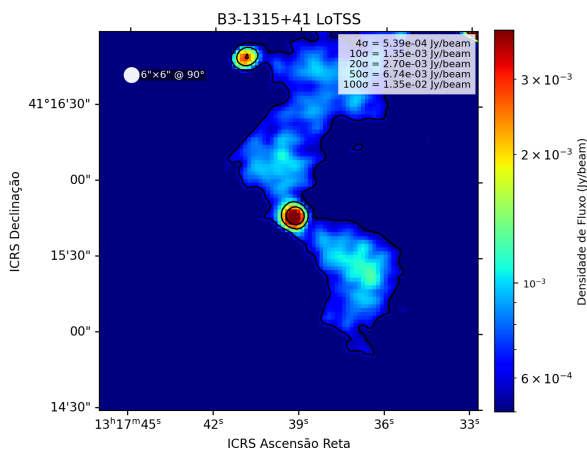
(d) Fonte 23: B3-1128+455



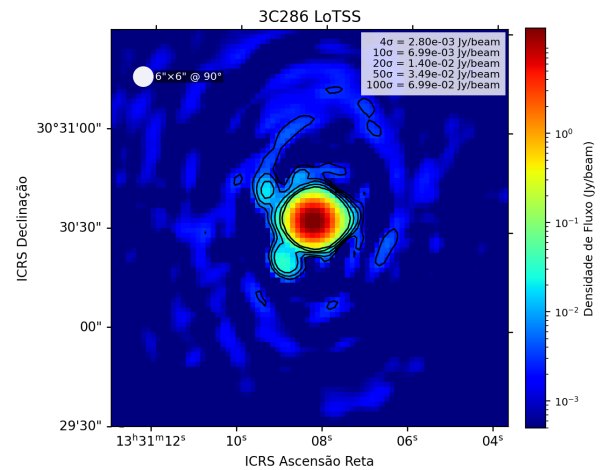
(e) Fonte 24: 4C+46.23



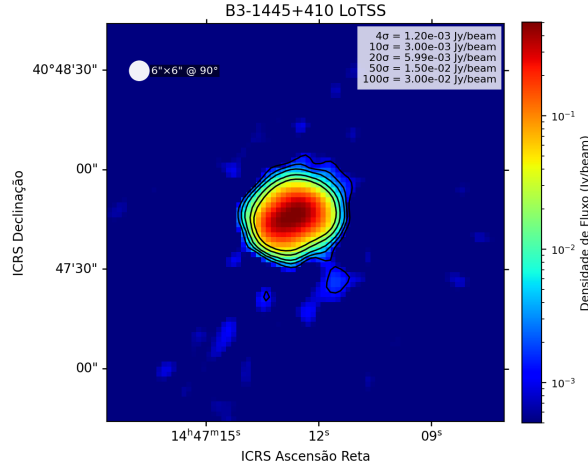
(f) Fonte 25: [HB89]1153



(g) Fonte 35: B3-1315+41



(h) Fonte 36: 3C286



(i) Fonte 45: B3-1445+410

Figura 4.1: Imagens LoTSS a 144 MHz das 9 fontes estendidas. Nota-se a presença de emissão difusa de baixo brilho superficial nas fontes 2, 10, 23, 25 e 35; as demais apresentam uma emissão maior que o feixe ($6'' \times 6''$ (PA = 90°)).

A seguir destacamos características morfológicas observadas nas fontes mais evidentes:

Fonte 2 (FBQSJ07411): Apresenta duas estruturas alongadas e alinhadas com o eixo central, compatíveis com *hotspots* bem definidos. Estrutura análoga a uma fonte FR II.

Fonte 10 (3C213.1): Exibe uma morfologia complexa, com emissão alongada e estruturas difusas que se estendem para além do núcleo central.

Fonte 15 (4C+39.29): Mostra uma emissão extensa. A estrutura apresenta um formato irregular, sugerindo a presença de lóbulos ou plumas referentes à atividade do jato.

Fonte 23 (B3-1128+455): Evidencia uma componente central brilhante envolvida por uma emissão estendida e com menor brilho superficial. A morfologia geral é alongada, indicando uma possível direção preferencial de ejeção do jato.

Fonte 24 (4C+46.23): Apresenta uma estrutura alongada e brilhante no centro. A configuração é sugestiva de um par de lóbulos simétricos.

Fonte 25 ([HB89]1153): Apresenta um núcleo pontual brilhante envolvido por emissão difusa de baixo brilho superficial que se estende além da componente central. Apesar da presença de ruído e artefatos instrumentais no campo, a estrutura estendida é claramente detectável de forma robusta, atingindo níveis de significância a 10σ em relação ao ruído local. Esta configuração morfológica sugere a presença de um jato envelhecido.

Fonte 35 (B3-1315+41): Exibe emissão de baixo brilho superficial no formato de plumas difusas emergindo de um núcleo brilhante, condizente com a morfologia clássica de fontes do tipo FRI.

Fonte 36 (3C286): Apresenta uma estrutura alongada e está a um *redshift* $z=0.85$, indicando que emissão é bem estendida. Assim como a fonte 24, a configuração é sugestiva de um par de lóbulos simétricos.

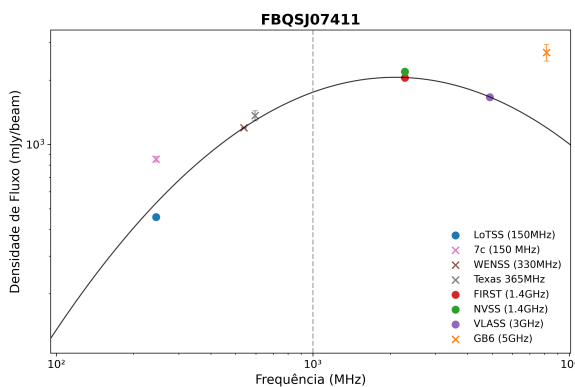
Fonte 45 (B3-1445+410): Apresenta uma morfologia alongada estendendo-se a partir

do núcleo. A estrutura sugere a presença de jatos ou lóbulos em desenvolvimento.

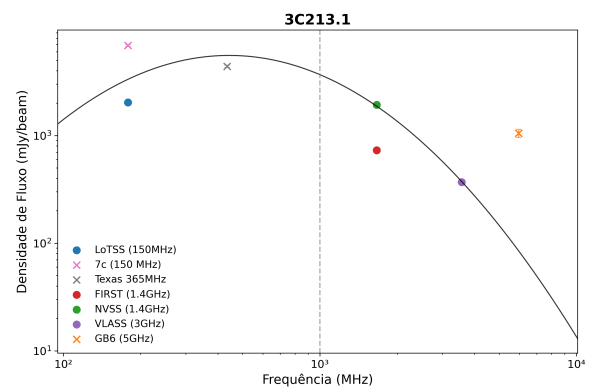
Todas as fontes exibem núcleos brilhantes em rádio, e a presença de emissão estendida é interpretada como evidência de episódios de atividade anteriores (jatos reiniciados). Fontes cujo índice espectral entre 144 MHz e 1.4 GHz é mais íngreme são consistentes com uma população de elétrons envelhecida, o que sugere que a reativação ocorreu há mais tempo e que o jato mais recente já alcançou regiões opticamente finas. Em contraste, fontes com espectro invertido ou sinais claros de autoabsorção, assim como fontes muito compactas, são compatíveis com jatos recentemente reativados que ainda não desenvolveram uma extensão linear significativa, características típicas de candidatos HFP/GPS.

4.2.2 Distribuição espectral de energia das fontes estendidas

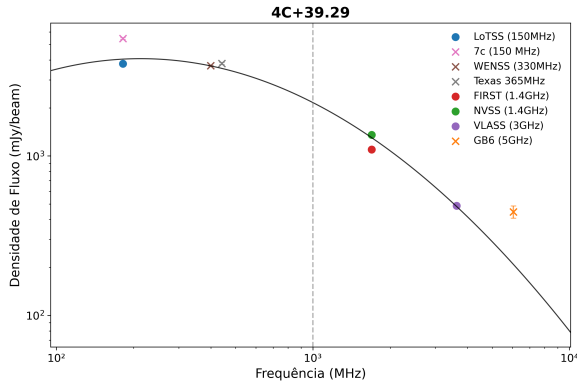
As SEDs nucleares das fontes são apresentadas na figura 4.2. Ressalta-se que os pontos coloridos correspondem a dados de fluxo obtidos através de medições manuais realizadas neste trabalho, enquanto os símbolos 'x' indicam valores de fluxo extraídos diretamente de catálogos públicos. A linha vertical tracejada em cada painel marca a frequência de 1 GHz como referência. Todas as SEDs foram corrigidas para o *redshift* das fontes, sendo apresentadas no referencial de repouso. Nota-se que, embora os valores de fluxo correspondam às frequências observadas, a posição horizontal dos pontos no gráfico representa a frequência já convertida para o sistema de repouso, permitindo a análise direta das propriedades espectrais intrínsecas das fontes.



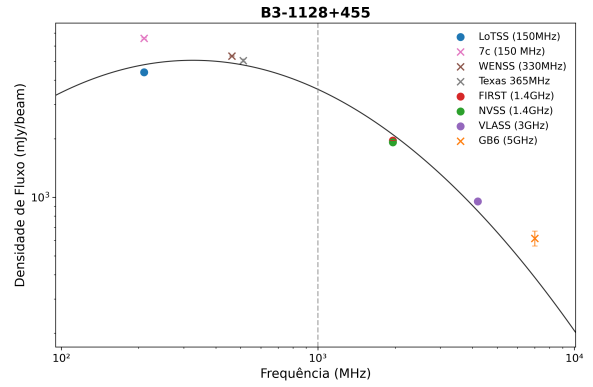
(a) Fonte 2: FBQSJ07411



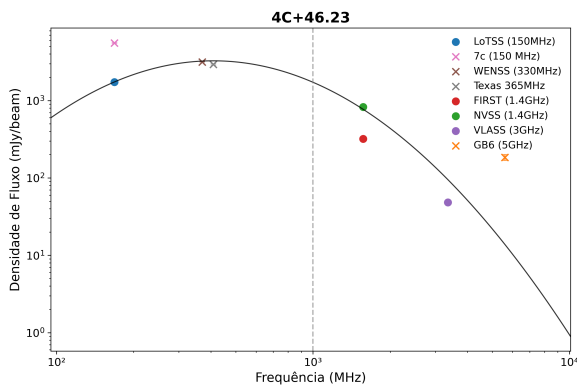
(b) Fonte 10: 3C213.1



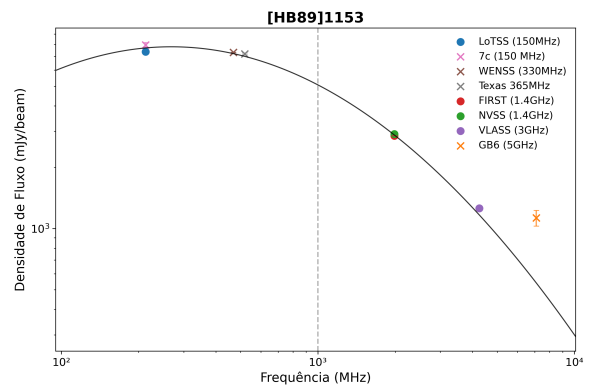
(c) Fonte 15: 4C+39.29



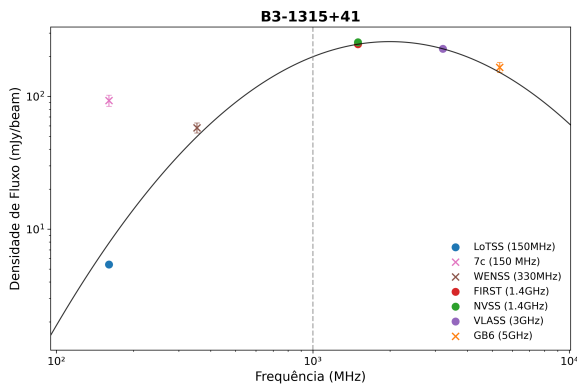
(d) Fonte 23: B3-1128+455



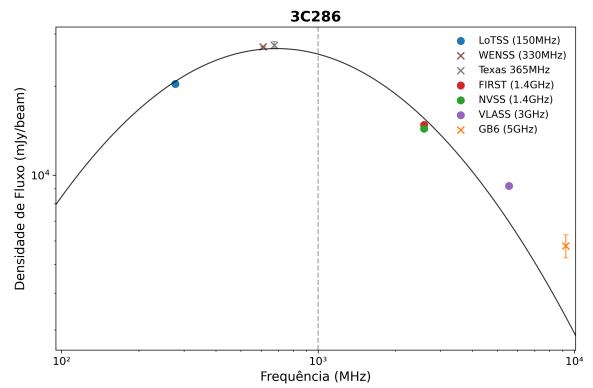
(e) Fonte 24: 4C+46.23



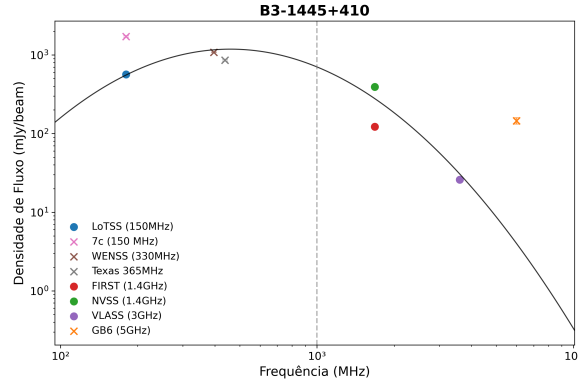
(f) Fonte 25: [HB89]1153



(g) Fonte 35: B3-1315+41



(h) Fonte 36: 3C286



(i) Fonte 45: B3-1445+410

Figura 4.2: SED da região nuclear das 9 fontes estendidas.

As distribuições espectrais apresentadas na figura 4.2 correspondem à região nuclear de cada fonte, portanto refletem a emissão associada ao jato jovem e não a contribuição das componentes remanescentes observadas no *LoTSS*. A seguir comentamos as características observadas em cada SED e as suas implicações físicas, usando como referência os índices espectrais listados na Tabela 4.1.

Fonte 2 (FBQSJ07411): pico em ~ 2093 MHz e índice espectral $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx +0.67$. A presença de um pico bem definido em frequências de ordem do GHz e um índice invertido na faixa considerada é compatível com um núcleo fortemente autoabsorvido, o que aponta para um jato muito jovem cuja emissão ainda é dominada por componentes compactas.

Fonte 10 (3C213.1): pico em ~ 443 MHz e índice espectral $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx -0.46$. Um *turnover* em algumas centenas de MHz indica que o jato já alcançou uma fase em que a emissão transita para o regime opticamente fino em frequências relativamente baixas. Esse comportamento é coerente com uma fonte no estágio CSS, em que jato já não está tão confinado e a emissão de começa a dominar em frequências mais baixas.

Fonte 15 (4C+39.29): pico em ~ 213 MHz e índice espectral $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx -0.56$, com achatamento em baixas frequências. O turnover particularmente baixo sugere uma componente de maior escala ou mais evoluída, enquanto o achatamento pode resultar de processos de absorção e mistura de regiões com componentes distintas do jato jovem com emissão difusa. No conjunto, os dados apontam para uma população de elétrons relativamente mais envelhecida na região nuclear ou para contribuição significativa de estruturas mais estendidas próximas ao núcleo.

Fonte 23 (B3-1128+455): pico em ~ 326 MHz e índice espectral $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx -0.36$. Essa fonte situa-se numa posição intermediária entre as anteriores, exibindo um turnover típico de CSS e um índice menos íngreme que pode indicar mistura entre núcleo e lóbulos próximos ou uma injeção relativamente recente de elétrons seguida por um envelhecimento moderado.

Fonte 24 (4C+46.23): pico em ~ 409 MHz e índice espectral $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx -0.75$. O *tur-*

turnover em algumas centenas de MHz combinado com um índice mais íngreme é consistente com emissão dominante de jatos mais envelhecidos, onde perdas radiativas tornaram o espectro mais pronunciadamente decrescente em frequência.

Fonte 25 ([HB89]1153): pico em ~ 268 MHz e achatamento em baixas frequências, índice espectral $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx -0.43$. Tal configuração é indicativa de uma fonte cujo núcleo apresenta um *turnover* em baixa frequência, possivelmente por confinamento moderado ou mistura de componentes com diferentes idades; o achatamento a baixas frequências sugere ainda contribuição de injeção recente de elétrons ou efeitos de absorção nessa banda.

Fonte 35 (B3-1315+41): pico em ~ 2042 MHz e índice espectral fortemente positivo $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx +2.57$. Um espectro invertido, associado a um *turnover* em torno de 2 GHz, aponta para um núcleo com jato extremamente jovem. Essa fonte apresenta uma morfologia estendida análoga a uma FR-I, evidenciando um religamento recente do jato.

Fonte 36 (3C286): pico em ~ 689 MHz e um índice espectral quase plano ($\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx -0.14$). A combinação de um pico GPS com um espectro quase plano sugere uma fonte em transição entre os estágios GPS e CSS.

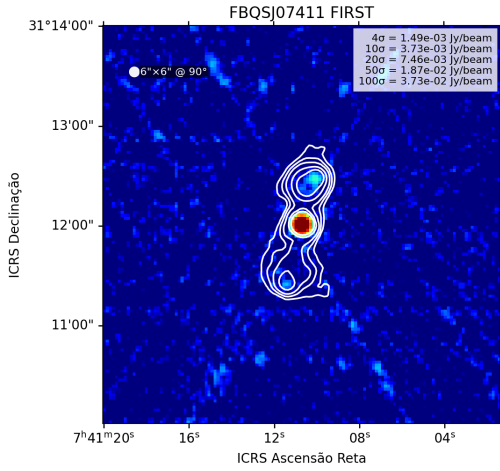
Fonte 45 (B3-1445+410): pico em ~ 460 MHz e índice espectral $\alpha_{144 \text{ MHz}}^{1.4 \text{ GHz}} \approx -0.68$. *Turnover* abaixo de 500 MHz e índice moderadamente íngreme são característicos de CSS cuja emissão já está, em boa parte, opticamente fina nas frequências consideradas, compatível com jatos que tiveram tempo para se expandir além do núcleo compacto.

Do conjunto, apenas duas fontes (3 e 36) apresentam picos nucleares em torno de $\sim 2 \times 10^3$ MHz e índices invertidos, sinais consistentes com jatos mais jovens e fortemente autoabsorvidos. As demais fontes mostram *turnovers* em algumas centenas de MHz (< 500), característicos de CSS, o que sugere uma população de jatos que já transitaram para o regime opticamente fino em frequências mais altas. Em vários casos, o achatamento observado em baixas frequências pode ser explicado pela superposição de componentes nucleares e próximas, por processos de absorção (por exemplo, autoabsorção síncrotron ou absorção livre–livre) ou por injeção recente de elétrons que produz uma população jovem menos afetada por perdas radiativas. Convém notar que o envelhecimento espectral atua principalmente tornando o espectro mais íngreme em frequências mais altas, pelo acúmulo de perdas radiativas.

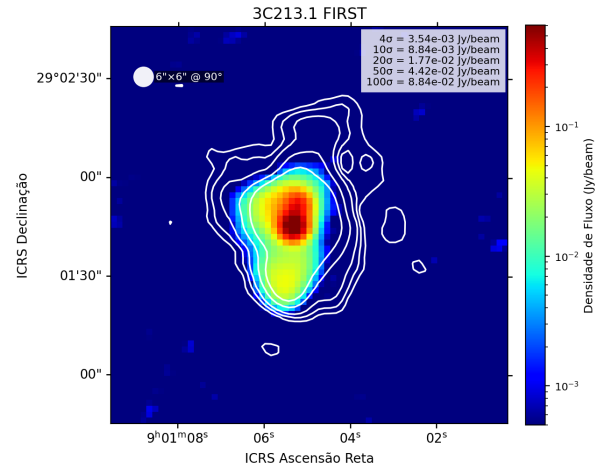
4.2.3 Imagens *FIRST* das fontes estendidas

A Figura 4.3 exibe as imagens do levantamento *FIRST* (1.4 GHz) correspondentes às fontes identificadas como estendidas no *LoTSS*, com contornos do mapa de 144 MHz sobrepostos para a comparação morfológica entre frequências. Essas sobreposições permitem avaliar se a emissão de baixo brilho superficial detectada no *LoTSS* persiste em frequências mais altas, verificar a correspondência entre núcleos compactos e estruturas

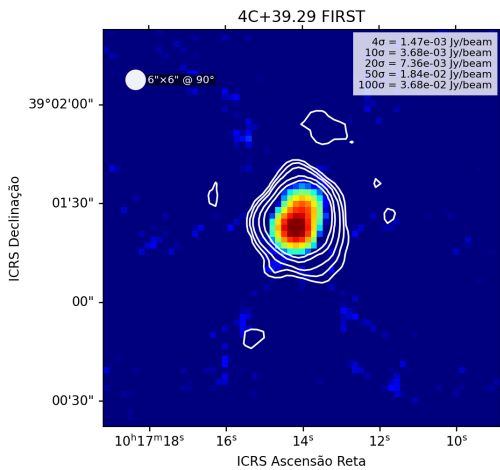
difusas e identificar desvios astrométricos. As imagens são usadas para distinguir núcleos pontuais de jatos ou lóbulos resolvidos e para verificar o alinhamento entre componentes.



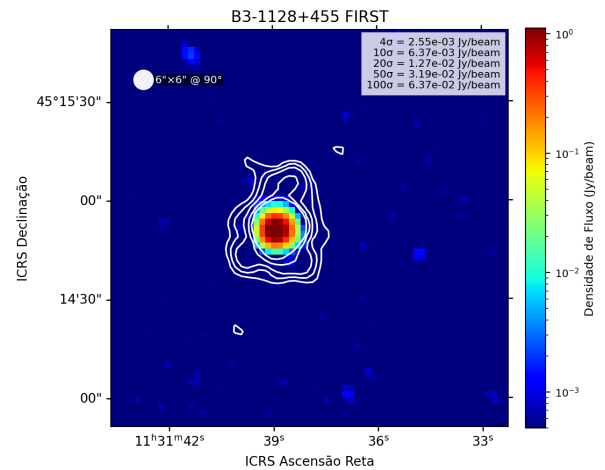
(a) Fonte 2: FBQSJ07411



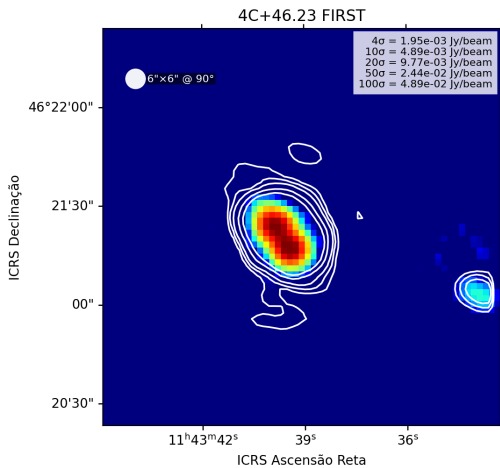
(b) Fonte 10: 3C213.1



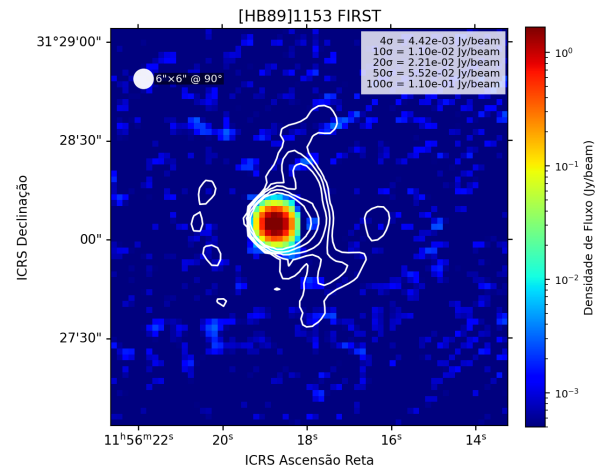
(c) Fonte 15: 4C+39.29



(d) Fonte 23: B3-1128+455



(e) Fonte 24: 4C+46.23



(f) Fonte 25: [HB89]1153

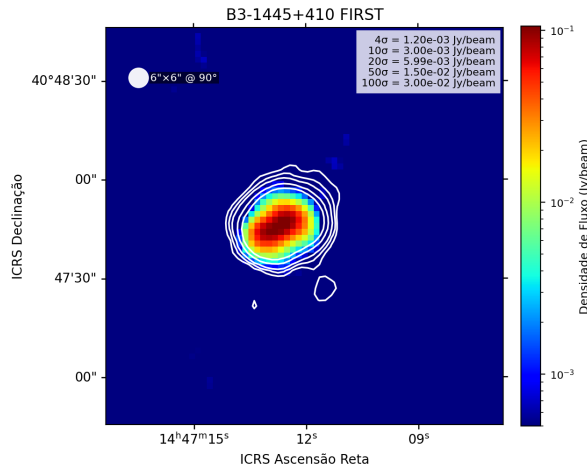
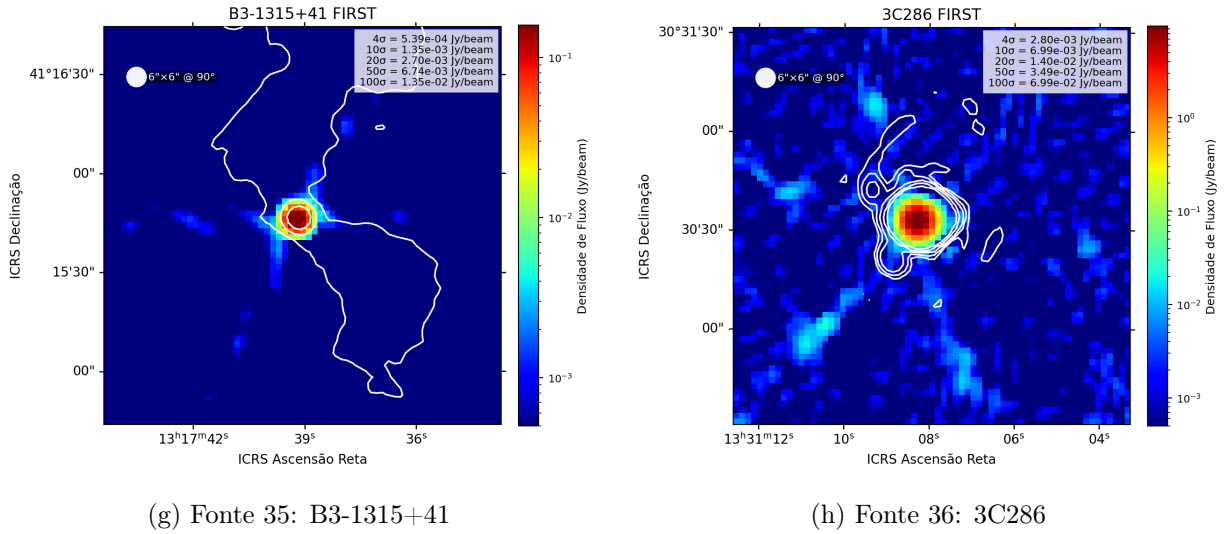


Figura 4.3: Imagens *FIRST* a 1.4 GHz das mesmas fontes mostradas em Fig. 4.1. Todas as imagens apresentam um núcleo brilhante imerso nos contornos referentes à emissão estendida detectada no *LoTSS*.

As imagens exibidas na Figura 4.3, com os contornos do mapa de 144 MHz sobrepostos, revelam as diferenças morfológicas associadas ao estágio evolutivo dos jatos. A seguir descrevemos as características observadas.

Fonte 2 (FBQSJ07411): Em *FIRST* o núcleo é bem compacto, enquanto os contornos do *LoTSS* evidenciam dois lóbulos simétricos com *hotspots* distantes do núcleo, morfologia análoga a uma fonte FR II. O índice espectral invertido e o pico em GHz são consistentes com um núcleo recentemente reativado coexistindo com lóbulos remanescentes. Os contornos ao nível de 10σ ressaltam os *hotspots*, enquanto contornos mais altos definem o núcleo compacto.

Fonte 10 (3C213.1): Apresenta emissão estendida detectável no *FIRST* dentro de uma emissão extensa no *LoTSS*. Esse padrão é compatível com uma configuração do tipo *double-double*, ou seja, pares aninhados de lóbulos, coerente com o *turnover* em centenas de MHz e com o índice espectral relativamente achatado da região nuclear, indicando

um jato não tão jovem propagando-se de forma coespacial com a emissão da atividade anterior.

Fonte 15 (4C+39.29): Mostra uma emissão alongada no *FIRST* dentro de contornos mais amplos do *LoTSS*. O achatamento espectral e o *turnover* em baixa frequência indicam que o jato já ultrapassou o meio denso opticamente espesso e que a emissão a 144 MHz contém componentes envelhecidas.

Fonte 23 (B3-1128+455): O núcleo é bem compacto no *FIRST* e está imerso numa emissão estendida detectada pelo *LoTSS*. Assim como o caso da fonte 16, a SED indica que o pico e achatamento do índice espectral em baixas frequências, caracterizam um jato se propaga em um meio opticamente fino, além da região central densa e opticamente espessa.

Fonte 24 (4C+46.23): Apresenta um núcleo alongado no *FIRST*, alinhado com a emissão estendida detectada no *LoTSS*. O índice espectral bem íngreme ($\alpha \approx -0.75$) é compatível com uma emissão espectralmente envelhecida dentro de uma emissão mais antiga.

Fonte 25 ([HB89]1153): Núcleo bem compacto no *FIRST* contido numa emissão estendida detectada no *LoTSS*, padrão típico de reinício em que o núcleo permanece brilhante e os lóbulos envelhecidos são visíveis apenas em baixa frequência.

Fonte 35 (B3-1315+41): O núcleo é bem compacto no *FIRST* e sobrepõe-se a plumas difusas com morfologia típica de FRI detectadas no *LoTSS*. O índice espectral fortemente positivo e o pico em GHz apontam para um reinício recente do jato.

Fonte 36 (3C286): Apresenta uma emissão no *FIRST* comparável com a emissão detectada no *LoTSS*. Conforme discutido na subseção 4.2.1. O alto *redshift* ($z = 0.85$) combinado com as características espectrais analisadas na SED, sugerem que esta fonte encontra-se em um estágio evolutivo intermediário entre GPS e CSS. A configuração observada é compatível com um jato em processo de propagação na interface entre regiões opticamente espessas e finas.

Fonte 45 (B3-1445+410): Assim como as fontes 11 e 25, apresenta um núcleo alongado no *FIRST* alinhado com a extensão no *LoTSS*. O *turnover* na faixa de MHz e o índice moderadamente íngreme são consistentes com um jato jovem já não tão confinado na região mais densa do AGN.

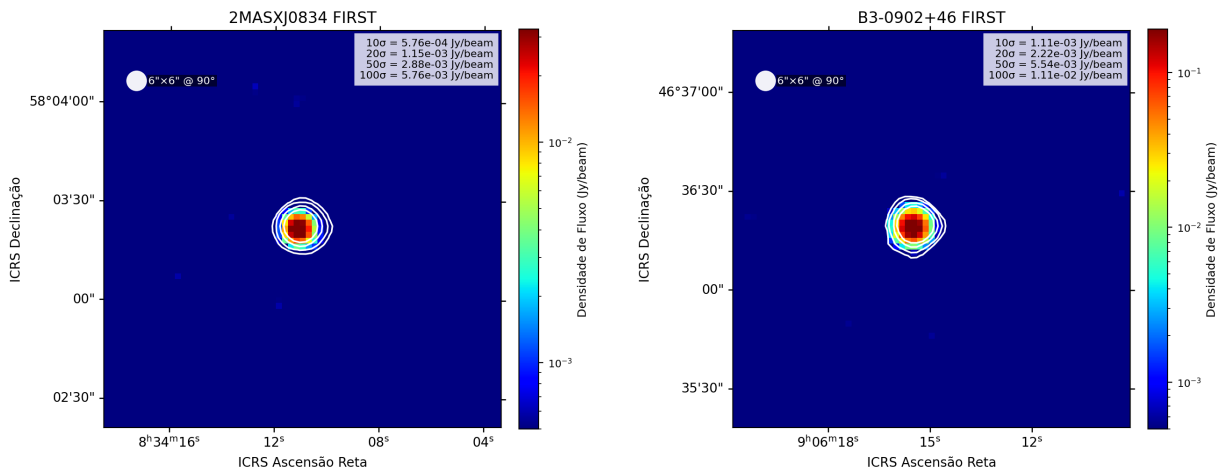
Do ponto de vista instrumental, todos os recortes do *LoTSS* usados aqui têm o feixe restaurado de $6'' \times 6''$ ($PA = 90^\circ$), com escala do feixe $\approx 1.5'' \text{ pixel}^{-1}$ no plano do céu. Em consequência, as componentes nucleares listadas acima aparecem em geral não resolvidas pelo feixe, enquanto a emissão estendida detectada em *LoTSS* tem dimensão claramente superior ao feixe. Por isso, o sinal diagnóstico de reinício que procuramos é a coexistência de um núcleo compacto visível em *FIRST* e/ou nos contornos internos de *LoTSS* embutido

em uma emissão estendida, difusa e de baixo brilho superficial detectável no *LoTSS*.

Para distinguir entre um reinício simples e um sistema *double-double*, adotamos critérios baseados na configuração morfológica. Nesses sistemas, o jato reativado propaga-se e expande-se dentro das plumas ou lóbulos remanescentes do episódio anterior de atividade, resultando em uma estrutura de pares aninhados. Um reinício com um intervalo de inatividade mais longo, por sua vez, tipicamente mostra um núcleo interno brilhante dentro de lóbulos externos substancialmente mais fracos, indicando um envelhecimento radiativo mais pronunciado nos lóbulos externos. No caso da Fonte 10, a detecção de estrutura interna no *FIRST* combinada com a emissão estendida no *LoTSS* torna a interpretação *double-double* plausível. Para o caso das fontes 24 e 45, onde há emissão estendida com índices espectrais mais íngremes, a hipótese de um período mais longo para o reinício tornado a emissão da atividade anterior mais fraca para ser detectada porém mantendo a morfologia de pares de lóbulos aninhados.

4.3 Fontes Compactas

A figura 4.4 apresenta alguns exemplos de fontes classificadas como compactas. Nestes recortes mostramos os mapas *FIRST* com os contornos do *LoTSS* sobrepostos. Definimos que uma fonte é compacta quando a imagem em ambos os levantamentos não apresentam emissão estendida e quando a componente nuclear é compatível com o feixe. Nos parágrafos seguintes comentamos as características observadas neste subgrupo.



(a) Fonte 7: 2MASXJ0834

(b) Fonte 11: B3-0902+46

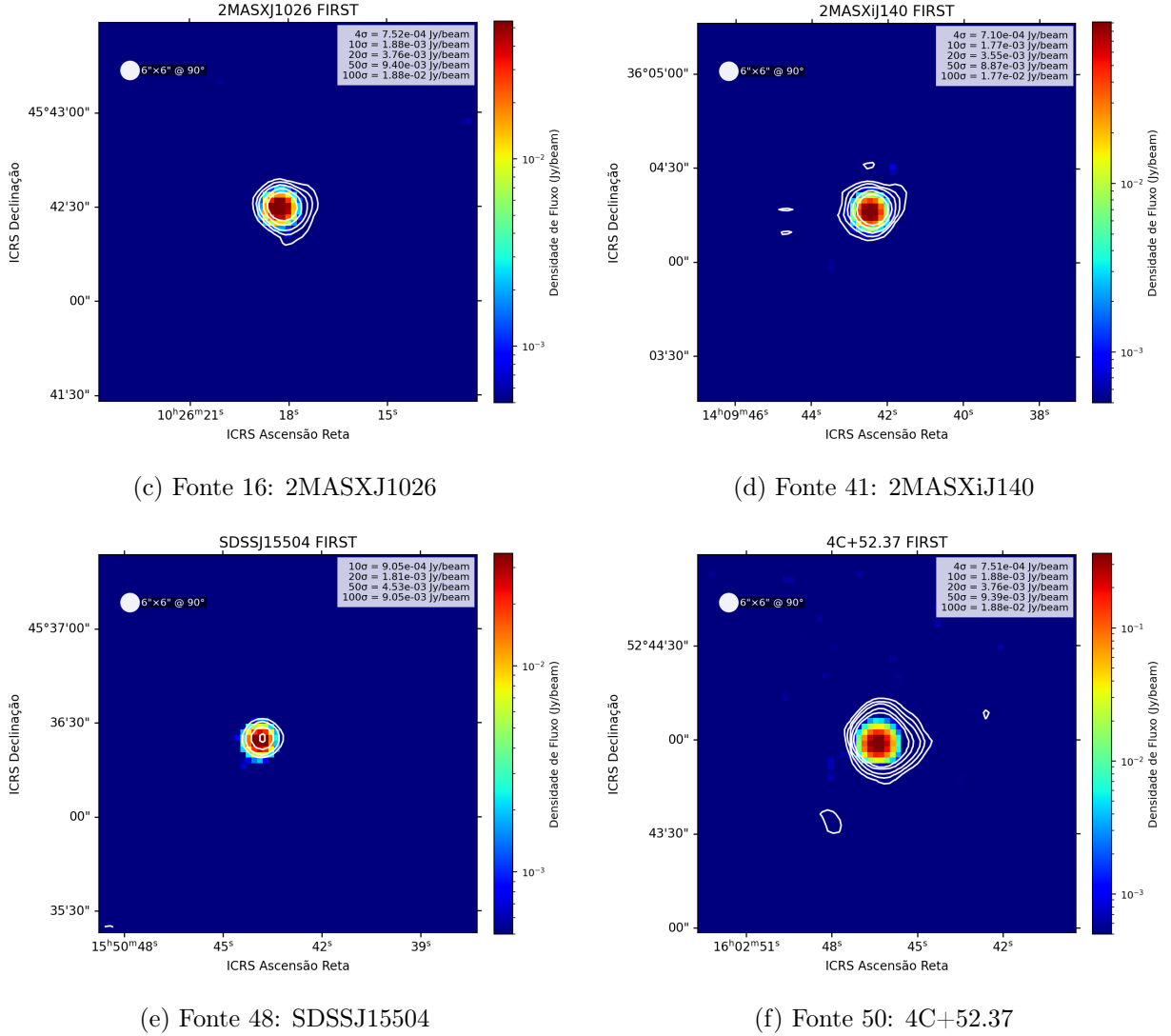


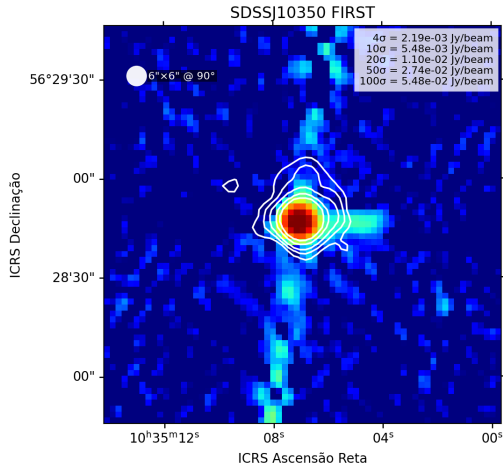
Figura 4.4: Imagens *FIRST* (1.4 GHz) dos campos selecionados, com contornos de *LoTSS* (144 MHz) sobrepostos para comparação morfológica.

No total, identificamos 28 fontes que se enquadram na categoria de compactas, ou seja, objetos que não exibem emissão estendida no *LoTSS* e permanecem não resolvidos no *FIRST*. Essas fontes mantêm morfologia pontual em ambas as frequências, com núcleo compatível com o feixe sintetizado, e representam a fração dominante da amostra analisada ($\sim 53\%$ do total de 52 objetos). Embora não revelem evidências claras de episódios anteriores de atividade, sua caracterização espectral continua sendo relevante para investigar a diversidade de propriedades nos núcleos jovens e avaliar potenciais casos de evolução futura para estágios mais estendidos.

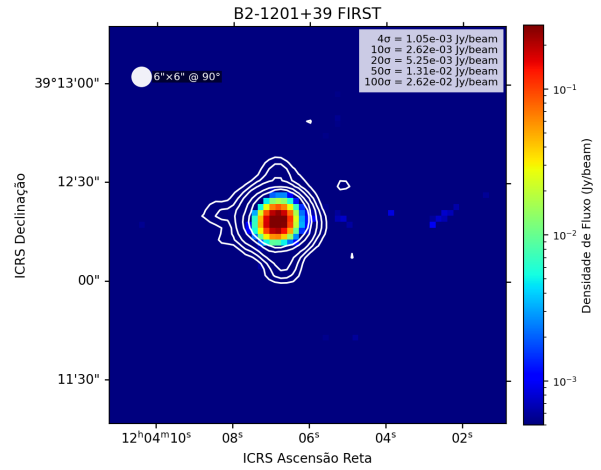
4.4 Fontes Indeterminadas

Apresentamos a seguir as fontes que, dada a qualidade local das imagens, não puderam ser classificadas de forma segura como compactas ou estendidas. A Figura 4.5 reúne

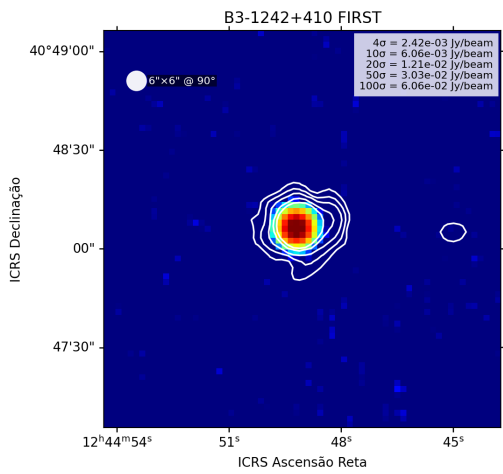
os recortes *FIRST* com os contornos de *LoTSS* sobrepostos para as seis fontes deste subgrupo. Essas fontes exibem sinais de possível extensão além do feixe, porém a presença de ruído elevado e artefatos nos mapas torna a interpretação morfológica inconclusiva com os dados disponíveis.



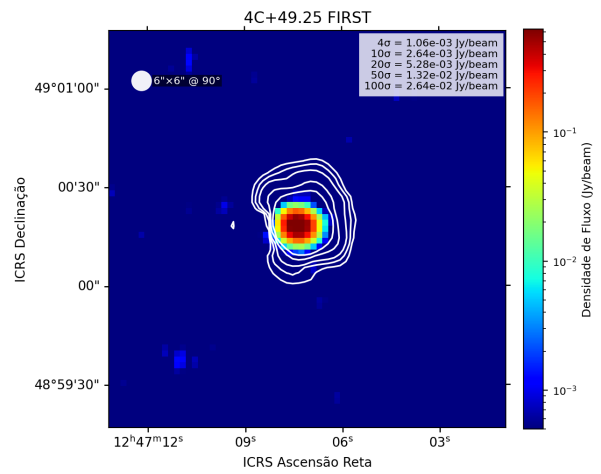
(a) Fonte 18: SDSSJ10350



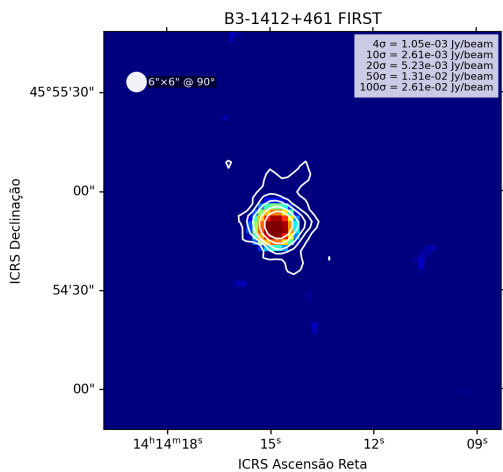
(b) Fonte 27: B2-1201+39



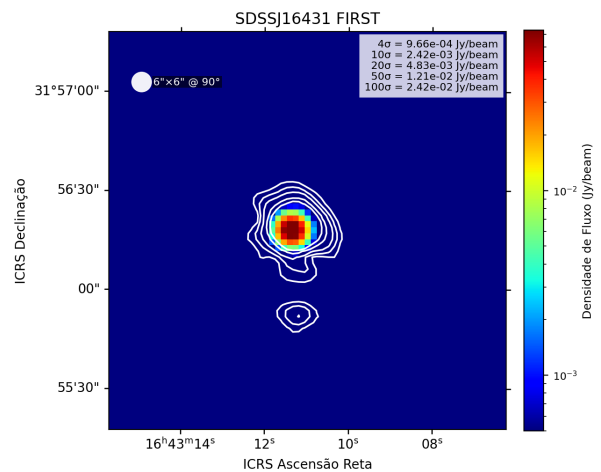
(c) Fonte 31: B3-1242+410



(d) Fonte 32: 4C+49.25



(e) Fonte 43: B3-1412+461



(f) Fonte 52: SDSSJ16431

Figura 4.5: Recortes *FIRST* (1.4 GHz) com contornos de *LoTSS* (144 MHz) sobrepostos para as seis fontes classificadas como indeterminadas. Em muitos casos a extensão aparente ocorre em níveis próximos a 4σ – 10σ locais, tornando a interpretação morfológica sujeita a incertezas ligadas a ruído e artefatos de imagem.

A seguir descrevemos as seis fontes indeterminadas:

Fonte 18 (SDSSJ10350): Apresenta na imagem uma possível extensão além do núcleo, porém a assinatura é fraca e alinhada a zonas com ruído/artefatos, tornando a classificação morfológica incerta.

Fonte 27 (B2-1201+39): Mostra-se essencialmente pontual em ambos os levantamentos, com alguma estrutura marginal que pode ser real ou consequência de ruído local; classificação ambígua até confirmação por maior sensibilidade.

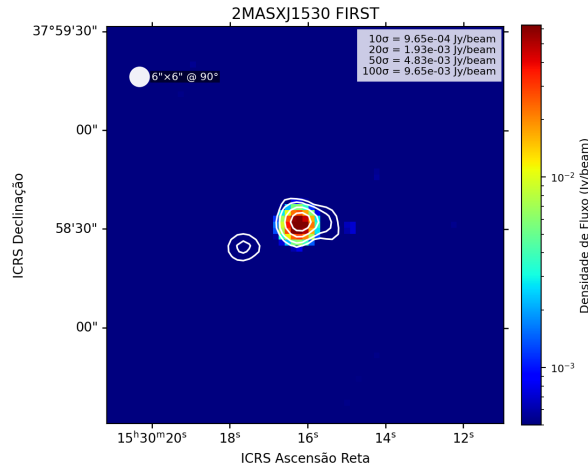
Fonte 31 (B3-1242+410): A morfologia parece compacta no *FIRST* e apresenta uma possível extensão além do núcleo, mas a fonte apresenta um *redshift* elevado ($z=0.81$); a baixa razão sinal/ruído local impede uma conclusão segura.

Fonte 32 (4C+49.25): Exibe uma leve alongação aparente no campo, mas a evidência não é robusta; classificação ambígua até confirmação por maior sensibilidade.

Fonte 43 (B3-1412+461): Apresenta estrutura ligeiramente estendida em níveis próximos ao ruído de fundo; a origem desta extensão (real ou artefato de imagem) é inconclusiva com os dados disponíveis.

Fonte 52 (SDSSJ16431): Mostra uma “bolha” desconectada da emissão principal no mapa do *LoTSS*; o sinal desse componente é consistente pode-se tratar de uma emissão remanescente de atividade anterior, essa bolha não possui contrapartida óptica conhecida. Esta fonte necessita de inspeção adicional e confirmação independente.

Adicionalmente, é possível notar que a fonte 46: 2MASXJ1530 (figura 4.6) exibe uma *bolha* análoga a observada na fonte 52 (SDSSJ16431), porém no caso específico da 2MASXJ1530 o componente possui contrapartida óptica identificável, trata-se claramente de um objeto separado no campo. Essa associação óptica permite classificar 2MASXJ1530 fonte como compacta confirmada, ilustrando que a presença (ou não) de contrapartida em bandas ópticas/IR é um discriminante prático importante para separar objetos independentes no campo e artefatos/ruído de estruturas reais.



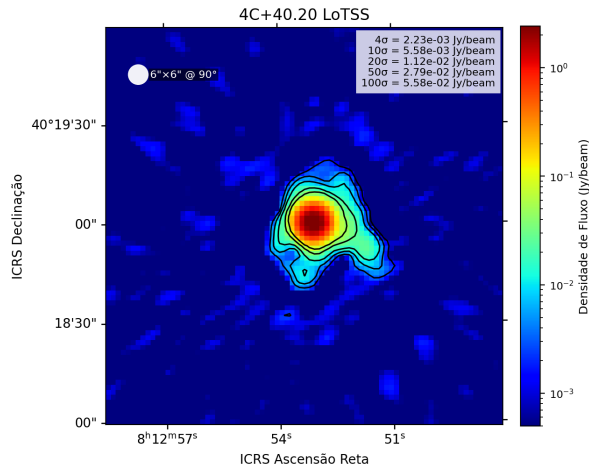
Fonte 46: 2MASXJ1530

Figura 4.6: Fonte 46 (2MASXJ1530): Recorte do *FIRST* (1.4 GHz) com contornos de *LoTSS* (144 MHz). Observa-se o componente adicional (“blob”) no campo que possui contrapartida óptica, indicando ser um objeto separado e justificando a classificação da fonte 2MASXJ1530 como compacta confirmada.

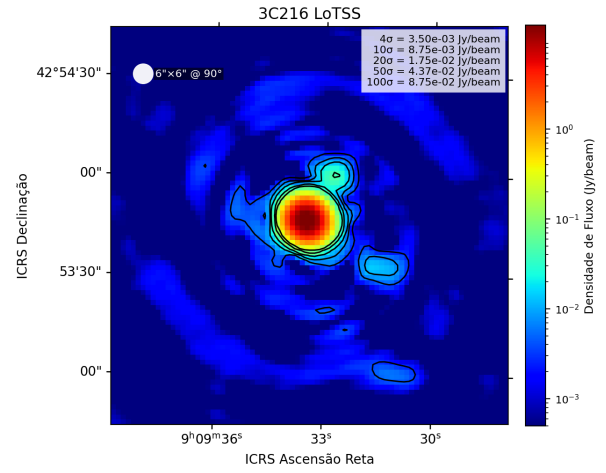
Em suma, as seis fontes classificadas como indeterminadas mostram extensão fraca, artefatos ou estruturas próximas ao nível de ruído, tornando sua classificação inconclusiva; confirmações exigem levantamentos com maior sensibilidade e/ou etapas adicionais de processamento de dados.

4.5 Candidatas a Fontes Reiniciadas

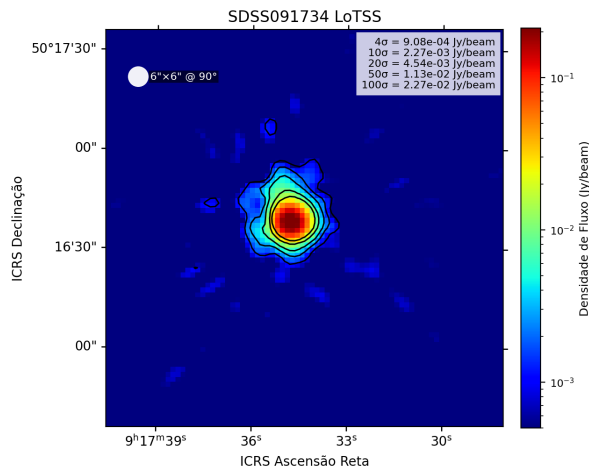
As candidatas a fontes reiniciadas formam um subconjunto na amostra que exhibe características morfológicas e espectrais que indicam fontes estendidas, porém com evidências menos conclusivas do que as apresentadas na subseção 4.2.1. Estas fontes, aqui categorizadas como candidatas, mostram indícios de emissão além do núcleo (ver Figura 4.7) nos mapas do *LoTSS*, mas sua classificação é impedida por uma combinação de fatores limitantes, incluindo *redshift* elevado, ruído instrumental significativo, presença de artefatos de imagem ou complexidade do campo.



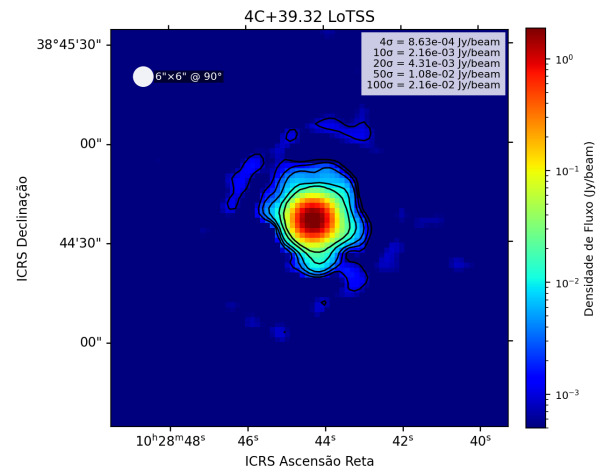
(a) Fonte 5: 4C+40.20



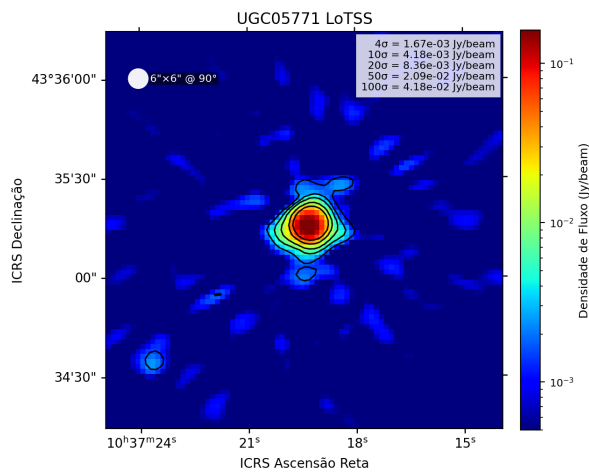
(b) Fonte 12: 3C216



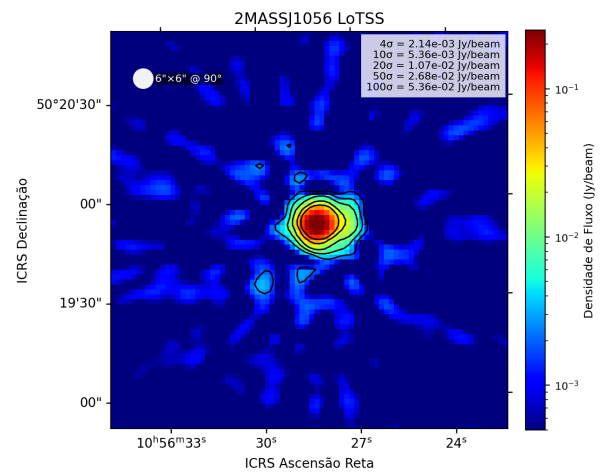
(c) Fonte 13: SDSS091734



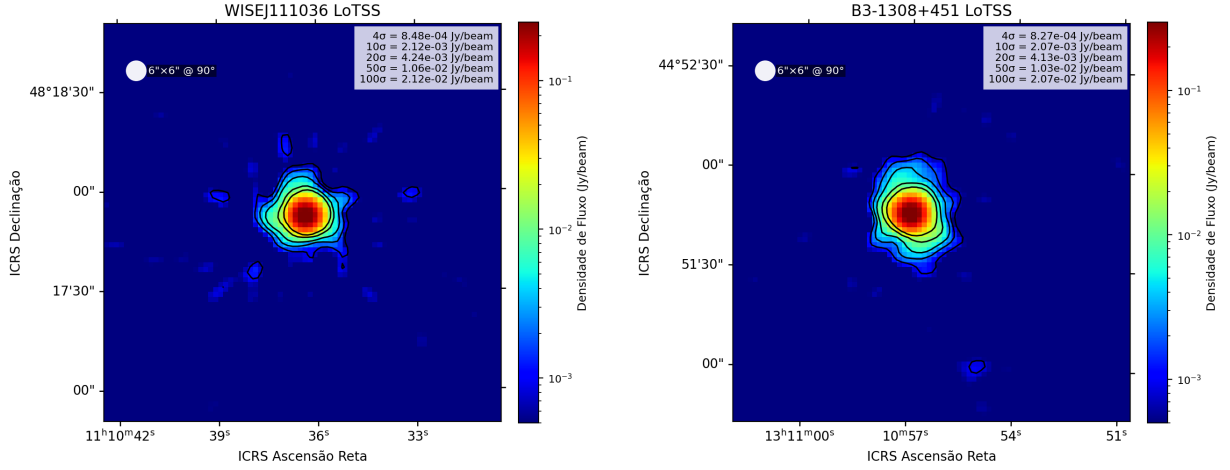
(d) Fonte 17: 4C+39.32



(e) Fonte 19: UGC05771

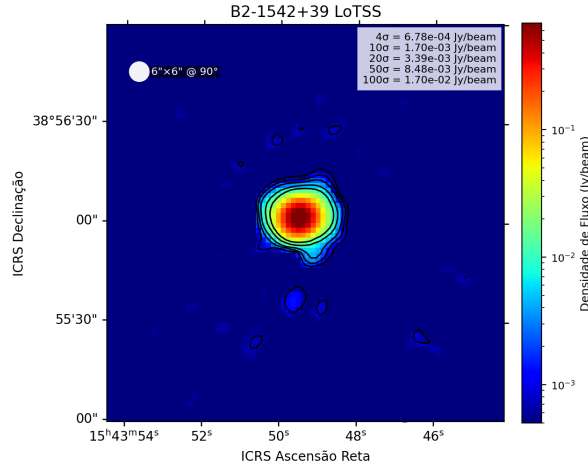


(f) Fonte 21: 2MASSJ1056



(g) Fonte 22: WISEJ111036

(h) Fonte 34: B3-1308+451



(i) Fonte 47: B2-1542+39

Figura 4.7: Imagens *FIRST* a 1.4 GHz das mesmas fontes mostradas em Fig. 4.1. Todas as imagens apresentam um núcleo brilhante imerso nos contornos referentes à emissão estendida detectada no *LoTSS*.

A distinção fundamental entre as fontes candidatas aqui apresentadas e as fontes indeterminadas previamente discutidas reside no grau de plausibilidade morfológica e nos indícios espectrais complementares. Enquanto as fontes indeterminadas apresentam estruturas tão fracas ou ambíguas que sua própria natureza física permanece incerta, as candidatas exibem assinaturas mais consistentes com emissão extensa real, ainda que não completamente conclusivas. A confirmação definitiva destas candidatas, no entanto, exigirá observações futuras com maior sensibilidade e resolução angular.

4.6 Discussão Geral e Resumo Estatístico da Amostra

Neste capítulo apresentamos a análise morfológica e espectral das 52 fontes da amostra final, com ênfase na identificação de emissão estendida de baixo brilho superficial em imagens de baixa frequência (*LoTSS*) e na comparação com mapas de alta resolução

(*FIRST*). A classificação morfológica revelou uma população majoritariamente compacta, mas também um conjunto notável de fontes com emissão estendida e múltiplas candidatas que requerem confirmação. A caracterização espectral, baseada em índices e *turnovers* entre 144 MHz e 1.4 GHz, mostra uma mistura de classes (GPS, CSS, F e HFP) que corrobora a diversidade evolutiva das radiogaláxias analisadas. A seguir apresentamos as estatísticas resumidas e discutimos suas implicações.

Tabela 4.2: Contagem morfológica da amostra.

Classe morfológica	N	Fração (%)
Compactas	28	53.8%
Estendidas	9	17.3%
Candidatas a estendidas	9	17.3%
Indeterminadas	6	11.5%
Total	52	100%

A Tabela 4.2 resume a distribuição morfológica da amostra ($N = 52$) em quatro classes: compactas (28), estendidas (9), candidatas a estendidas (9) e indeterminadas (6). Esses números mostram que, embora a maioria das fontes originalmente catalogadas como CSS/GPS permaneça pontual nas imagens de alta resolução em 1.4 GHz, há uma fração não desprezível $\sim 17\%$ com emissão estendida clara em baixa frequência, configurando um sinal consistente de atividade prévia nos jatos. As candidatas representam um grupo intermediário cujo diagnóstico é limitado por ruído local, ruído de mapeamento ou pelo efeito de projeção associado ao *redshift*; elas sublinham que a prevalência real de reinícios pode ser subestimada pela sensibilidade/resolução dos levantamentos disponíveis. As indeterminadas, por sua vez, reforçam a necessidade de dados complementares: campos ruidosos ou artefatos tornam inseguras interpretações morfológicas mesmo quando há indicação marginal de extensão.

Tabela 4.3: Classificação espectral da amostra.

Classe espectral	N	Fração (%)
GPS (pico ≥ 500 MHz)	17	32.7%
CSS (pico < 500 MHz)	14	26.9%
F (plano / achatamento)	19	36.5%
HFP	2	3.8%
Total	52	100%

A Tabela 4.3 compila a classificação espectral e permite extrair relações físicas entre espectro e morfologia. Em nossa amostra observa-se uma tendência clara: fontes com pico em MHz (CSS) aparecem com maior frequência entre as categorias estendidas (de fato, 6 das 9 fontes claramente estendidas pertencem à classe CSS) enquanto fontes com pico em GHz (GPS) tendem a ser mais frequentemente pontuais na alta resolução em 1.4 GHz,

compatíveis com jatos confinados e autoabsorvidos. Fontes classificadas como HFP são raras na amostra e concentram-se entre os objetos pontuais, reforçando a interpretação de jatos extremamente compactos e muito jovens. Essa correlação sugere um cenário evolutivo em que picos em frequências mais baixas acompanham populações de elétrons mais envelhecidas e lóbulos remanescentes, ao passo que picos em GHz sinalizam jatos jovens confinados na região nuclear.

Em suma, este capítulo quantificou e caracterizou a diversidade morfológica e espectral da nossa amostra de GPS/CSS, identificando um conjunto relevante de fontes com assinatura de reinício de atividade e outras candidatas que exigem confirmação futura. Essas estatísticas e os exemplos individuais discutidos apresentam evidências que serão sintetizadas no próximo capítulo.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Resumo e conclusões

Apresentamos uma análise sistemática de uma amostra previamente classificada como CSS/GPS, combinando imagens de baixa frequência (LoTSS, 144 MHz) com levantamentos de maior resolução em GHz (FIRST, VLASS) e catálogos históricos. A partir desta análise, podemos sintetizar os resultados e as conclusões principais do trabalho:

1. Uma fração relevante das fontes previamente catalogadas como CSS/GPS mostra evidências observacionais compatíveis com reinício de atividade de jatos. Dependendo dos critérios de identificação (sinais claros versus candidatas ambíguas), estimamos uma fração na faixa de $\sim 17\%$ e $\sim 40\%$ de reinício na amostra, com 9 objetos claramente classificados como reiniciadas e 12 como candidatas (Tabela 4.2).
2. Aproximadamente 18 fontes (35% da amostra) exibem espectros planos ou com achatamento em baixas frequências, um resultado que pode refletir contribuição nuclear significativa, auto-absorção em regiões compactas, ou contaminação por emissão recente do núcleo. A combinação de informação espectral e morfológica é essencial para distinguir essas possibilidades.
3. A combinação de imagens de baixa frequência (LoTSS) com dados de alta resolução (FIRST) é decisiva para identificar jatos compactos embutidos em emissão difusa estendida: LoTSS detecta eficazmente halos e lóbulos envelhecidos de baixo brilho superficial, enquanto FIRST resolve e caracterizam os componentes nucleares. A análise conjunta revela de forma robusta o cenário reiniciado.
4. Metodologicamente, demonstramos a importância de procedimentos consistentes ao construir SEDs multifrequência: normalização de fluxos (unidades homogêneas), verificação de perdas de fluxo por resolução e tratamento cuidadoso de incertezas sistemáticas são um passo chave para evitar classificações errôneas.

5. A existência de uma fração não desprezível de fontes reiniciadas implica que catálogos históricos construídos em bandas GHz e com resolução limitada podem subestimar a ocorrência de episódios múltiplos de atividade AGN. Consequentemente, estimativas de tempo de vida e taxas de reinício de jatos baseadas exclusivamente em levantamentos de alta frequência devem ser revistas com o auxílio de levantamentos em baixas frequências.
6. Limitações observacionais e interpretações: a faixa de 17-40% para a taxa de reinício traduz incertezas originadas de critérios de classificação (definição de “emissão estendida clara” versus “candidatas”), sensibilidade e cobertura dos levantamentos disponíveis, e possíveis efeitos de variabilidade não simultânea. Essas limitações motivam a necessidade de análises estatísticas maiores e de análises futuras.

5.2 Implicações científicas

Enquanto estudos prévios concentraram-se predominantemente na investigação individual de fontes específicas, a presente análise destaca-se por examinar uma amostra significativa de objetos. Este é o primeiro trabalho realizado na área de radiogaláxias utilizando dados do LOFAR no Observatório Nacional e possivelmente no Brasil. Esperamos que tal feito abra oportunidade para futuros trabalhos nesta direção.

Os resultados indicam que o ciclo de vida dos jatos rádio pode ser mais complexo e recorrente do que implicam modelos evolutivos lineares simples. Uma fração substancial de objetos classificados como compactos pode, na verdade, representar episódios recentes de atividade sobrepostos a remanescentes extensos de ignições passadas. Isso tem implicações diretas sobre:

- estimativas do ciclo de vida de radiogaláxias e da fração de tempo que eles passam em estados compactos versus estendidos;
- modelos de evolução espectral e de envelhecimento, que devem considerar múltiplos episódios e sobreposição de populações de elétrons com idades distintas;
- a avaliação do feedback em AGNs em diferentes escalas e épocas, visto que episódios repetidos podem depositar energia de forma cumulativa no meio circumgaláctico.

5.3 Limitações do estudo

Embora a combinação LoTSS + FIRST tenha se mostrado eficiente para comparação morfológica, o trabalho está sujeito a várias limitações:

- Sensibilidade e resolução variam entre levantamentos: perdas de fluxo em altas resoluções e incapacidade de detectar emissão de baixo brilho superficial podem enviesar a classificação.
- Observações não simultâneas: variabilidade nuclear pode alterar temporariamente a forma do espectro, gerando pontos discrepantes nas SEDs.
- Critérios de classificação: a separação entre reiniciada, candidata e compacta envolve limiares que introduzem incerteza estatística. A faixa 17%–40% reflete este efeito.
- Amostra limitada: embora representativa para as intenções deste estudo, conclusões definitivas sobre populações cosmológicas requerem amostras maiores com cobertura de *redshift* mais abrangente.

5.4 Recomendações e trabalhos futuros

Para avançar na compreensão dessas fontes e reduzir incertezas, propomos as seguintes linhas de continuidade:

- **Caracterização dos jatos:** determinação do ângulo de inclinação do jato em relação à linha de visada, cálculo do tamanho linear projetado e estimativa da idade cinética. Esses parâmetros são fundamentais para compreender o estágio evolutivo e a propagação do jato no meio galáctico.
- **Interação do jato e meio interestelar e modos de feedback:** investigação dos mecanismos de transferência de energia e momento para o meio interestelar por meio de imagens de alta resolução e espectroscopia multi-bandas, com o objetivo de distinguir contribuições de choques e de fotoionização. A quantificação do acúmulo de energia depositada por múltiplos episódios de atividade é crucial para avaliar a eficiência do *feedback* na regulação da formação estelar e no aquecimento do meio interestelar.
- **Feedback mecânico em fontes GPS:** o estudo dos efeitos do *feedback* mecânico do jato sobre o meio interestelar é particularmente relevante. Fontes do tipo GPS constituem laboratórios ideais para essa investigação, uma vez que os jatos permanecem confinados à região nuclear, favorecendo interações intensas e permitindo estimativas diretas da transferência de energia mecânica.
- **Amostras maiores e análise estatística:** estender o método a catálogos maiores e uniformes (por exemplo, todo LoTSS) para quantificar estatisticamente a taxa de reinício e sua dependência em luminosidade, *redshift* e propriedades da hospedeira.

5.5 Considerações finais

Este trabalho reforça que a combinação de levantamentos de baixa frequência e imagens de alta resolução é fundamental para compreender a verdadeira natureza das fontes rádio compactas. A identificação de uma fração não desprezível de fontes reiniciadas muda a visão tradicional de evolução linear $GPS/CSS \rightarrow FR$, sugerindo um papel mais ativo e cíclico dos jatos no ciclo de vida de radiogaláxias. Estudos futuros, com amostras maiores e observações subsequentes, são necessários para consolidar essas conclusões e quantificar de forma robusta o impacto desses episódios múltiplos no contexto de evolução de galáxias e feedback AGN.

Referências Bibliográficas

- Alam, S., Albareti, F. D., Prieto, C. A., et al., 2015, “The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 219, pp. 12.
- Antonucci, R., 1993, “Unified models for active galactic nuclei and quasars”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 31, pp. 473–521. doi: 10.1146/annurev.aa.31.090193.002353.
- Blandford, R. D., Rees, M. J., 1978, “Some comments on radiation mechanisms in Lacertids”, *Physica Scripta*, v. 17, n. 3, pp. 265–274. doi: 10.1088/0031-8949/17/3/017.
- Blandford, R. D., Znajek, R. L., 1977, “Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 179, n. 3, pp. 433–456. doi: 10.1093/mnras/179.3.433.
- Blandford, R. D., Meier, D., Readhead, A., 2018, “Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 56, pp. 541–592. doi: 10.1146/annurev-astro-081817-051654.
- Brienza, M., Morganti, R., Shulevski, A., et al., 2016, “A LOFAR view on the duty cycle of young radio sources”, *Astronomische Nachrichten*, v. 337, n. 1-2, pp. 31–35. doi: 10.1002/asna.201512260.
- Callingham, J. R., Ekers, R. D., Gaensler, B. M., et al., 2017, “Extragalactic Peaked-Spectrum Radio Sources at Low Frequencies”, *The Astrophysical Journal*, v. 836, pp. 174.
- Condon, J. J., Ransom, S. M., 2016, *Essential Radio Astronomy*. Princeton University Press.
- Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W., et al., 1998, “The NRAO VLA Sky Survey”, *The Astronomical Journal*, v. 115, n. 5 (may), pp. 1693. doi: 10.1086/300337. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1086/300337>>.

- de Bruyn, A. G., Miley, G. K., Rengelink, R. B., et al., 1998, *WENSS – The Westerbork Northern Sky Survey: first description and data release*. Relatório técnico, Leiden Observatory / NFRA/ASTRON. ADC Catalogue VIII/62.
- Douglas, J. N., Bash, F. N., Bozayan, F. A., et al., 1996, “The Texas Survey of Radio Sources at 365 MHz”, *The Astronomical Journal*, v. 111, pp. 1945–1963.
- Fabian, A. C., 2012, “Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 50 (set.), pp. 455–489. doi: 10.1146/annurev-astro-081811-125521.
- Fanaroff, B. L., Riley, J. M., 1974, “The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 167, pp. 31P–36P. doi: 10.1093/mnras/167.1.31P.
- Fanti, C., Fanti, R., Dallacasa, D., et al., 1995, “Are Compact Steep-Spectrum Sources Young?” *Astronomy & Astrophysics*, v. 302, pp. 317–326.
- Fanti, C., Pozzi, F., Fanti, R., et al., 2001, “A Complete Sample of Compact Steep Spectrum Radio Sources at Low Frequency”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 369, pp. 380–390.
- Fanti, R., Fanti, C., Schilizzi, R. T., et al., 1990, “The Bologna B2 bright sample of CSS and GPS radio sources”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 231, pp. 333–346.
- Fossati, G., others, 1998, “A Unifying View of the Spectral Energy Distributions of Blazars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 299, n. 2, pp. 433–448. doi: 10.1046/j.1365-8711.1998.01828.x.
- Ghisellini, G., 2013, *Radiative Processes in High Energy Astrophysics*. Springer International Publishing. ISBN: 9783319006123. doi: 10.1007/978-3-319-00612-3. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-00612-3>>.
- Gordon, Y. A., Boyce, M. M., O’Dea, C. P., et al., 2021, “A Quick Look at the 3 GHz Radio Sky. I. Source Statistics from the Very Large Array Sky Survey”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 255, n. 2 (aug), pp. 30. doi: 10.3847/1538-4365/ac05c0. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/ac05c0>>.
- Gregory, P. C., Scott, W. K., Douglas, K., et al., 1996, “The GB6 Catalog of Radio Sources”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 103, pp. 427. doi: 10.1086/192282.

- Hales, S. E. G., Riley, J. M., Waldram, E. M., et al., 2007, “A final non-redundant catalogue for the 7C 151-MHz survey”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 382, pp. 1639–1642. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.12392.x.
- Hancock, P. J., Murphy, T., Gaensler, B. M., 2010, “Polarization Properties of CSS and GPS Sources”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 406, pp. 1130–1138.
- Helfand, D. J., White, R. L., Becker, R. H., 2015, “THE LAST OF FIRST: THE FINAL CATALOG AND SOURCE IDENTIFICATIONS”, *The Astrophysical Journal*, v. 801, n. 1 (feb), pp. 26. doi: 10.1088/0004-637X/801/1/26. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/801/1/26>>.
- Jarvis, M. E., Callingham, J. R., Hurley-Walker, N., 2019, “Peaked-Spectrum Radio Sources in GLEAM”, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, v. 36, pp. e035.
- Jeyakumar, S., 2016, “Optical Host Galaxies of Compact Steep Spectrum Radio Sources”, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, v. 37, pp. 23.
- Jurlin, N., Morganti, R., Brienza, M., et al., 2020, “A LOFAR study of restarted radio galaxies in the Lockman Hole”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 638, pp. A34. doi: 10.1051/0004-6361/201937110.
- Kellermann, K. I., 1999, “Active Galactic Nuclei”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 111, n. 756, pp. 167–175. doi: 10.1086/316306.
- Kellermann, K. I., Sramek, R., Schmidt, M., et al., 1989, “VLA observations of objects in the Palomar Bright Quasar Survey”, *The Astronomical Journal*, v. 98, pp. 1195–1207. doi: 10.1086/115207.
- Kunert, M., Marecki, A., Thomasson, P., 2002, “A New Sample of Low-Luminosity CSS Sources”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 391, pp. 47–54.
- Kunert-Bajraszewska, M., Labiano, A., 2010, “Low-Frequency Radio Study of the Sample of Young Radio Sources”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 408, pp. 2261–2271.
- Kunert-Bajraszewska, M., Gawroński, M. P., Labiano, A., et al., 2010, “A survey of low-luminosity compact sources and its implication for the evolution of radio-loud active galactic nuclei – I. Radio data”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 408, n. 4 (10), pp. 2261–2278. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17271.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17271.x>>.

- Lacy, M., Rawlings, S., Blundell, K. M., et al., 1995, “7C survey data release: batch 1 analysis”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 274, pp. 447–460.
- Ledlow, M. J., Owen, F. N., 1996, “FR I Radio Galaxies and the Black Hole Fundamental Plane”, *The Astronomical Journal*, v. 112, pp. 9–22. doi: 10.1086/117985.
- Longair, M. S., 2011, *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press. ISBN: 978-0521756181.
- McGilchrist, M. M., Baldwin, J. E., Riley, J. M., et al., 1990, “The 7C 151-MHz survey – I. Observations, data analysis and source compilation”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 247, pp. 131–146. doi: 10.1093/mnras/247.1.131.
- McMahon, R. G., White, R. L., Helfand, D. J., et al., 2002, “Optical Counterparts for 70,000 Radio Sources: APM Identifications for the FIRST Radio Survey”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 143, n. 1 (nov.), pp. 1–23. doi: 10.1086/342623.
- Morganti, R., 2024, “What Have We Learned about the Life Cycle of Radio Galaxies from New Radio Surveys”, *Galaxies*, v. 12, n. 2. ISSN: 2075-4434. doi: 10.3390/galaxies12020011. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-4434/12/2/11>>.
- Müller-Sánchez, F., Prieto, M. A., Hicks, E. K. S., et al., 2011, “Outflows from Active Galactic Nuclei: Kinematics of the Narrow-line and Coronal-line Regions in Seyfert Galaxies”, *Astrophys. J.*, 739(2):69. doi: 10.1088/0004-637X/739/2/69.
- Murgia, M., Fanti, C., Fanti, R., et al., 2002, “Synchrotron spectra and ages of compact steep spectrum radio sources”, *New Astronomy Reviews*, v. 46, n. 2, pp. 307–311. ISSN: 1387-6473. doi: [https://doi.org/10.1016/S1387-6473\(01\)00200-7](https://doi.org/10.1016/S1387-6473(01)00200-7). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387647301002007>>. Lifecycles of radio galaxies.
- Nascimento, R. S., Rodríguez-Ardila, A., Fonseca-Faria, M. A., 2022, “Optical Properties of Peaked Spectrum Radio Sources”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 511, pp. 214–230.
- Natarajan, P., Pacucci, F., Ricarte, A., et al., 2023, “First Detection of an Overmassive Black Hole Galaxy UHZ1: Evidence for Heavy Black Hole Seed Formation from Direct Collapse”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 960, n. 1 (dec), pp. L1. doi: 10.3847/2041-8213/ad0e76. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ad0e76>>.

- Netzer, H., 2015, “Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 53, n. 1, pp. 365–408. doi: 10.1146/annurev-astro-082214-122302. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122302>>.
- O’Dea, C. P., 1998, “The Compact Steep-Spectrum and Gigahertz-Peaked-Spectrum Radio Sources”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 110, pp. 493–532. doi: 10.1086/316162.
- O’Dea, C. P., Saikia, D. J., 2021, “Compact steep-spectrum and peaked-spectrum radio sources”, *Astronomy & Astrophysics Review*, v. 29, n. 1, pp. 3.
- Osterbrock, D. E., 1981, “Seyfert galaxies with weak broad H α emission lines”, *The Astrophysical Journal*, v. 249, pp. 462–470. doi: 10.1086/159306.
- Pacholczyk, A. G., 1970, *Radio Astrophysics: Nonthermal Processes in Galactic and Extragalactic Sources*. San Francisco, W. H. Freeman.
- Peck, A. B., Taylor, G. B., 2000, “Compact Symmetric Objects in the GPS Sample”, *The Astrophysical Journal*, v. 534, pp. 90–103.
- Perley, R. A., Chandler, C. J., Butler, B. J., et al., 2011, “THE EXPANDED VERY LARGE ARRAY: A NEW TELESCOPE FOR NEW SCIENCE”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 739, n. 1 (aug), pp. L1. doi: 10.1088/2041-8205/739/1/L1. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/739/1/L1>>.
- Peterson, B. M., 1997, “An Introduction to Active Galactic Nuclei”, *arXiv preprint astro-ph/9701137*.
- Pooley, G. G., Waldram, E. M., Riley, J. M., 1998, “7C survey: data reduction and catalogue release for batches 3–5”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 297, pp. L60–L64.
- Readhead, A. C. S., Taylor, G. B., Pearson, T. J., et al., 1996, “Compact Symmetric Objects and the Evolution of Powerful Extragalactic Radio Sources”, *Astrophys. J.*, v. 460 (abr.), pp. 634. doi: 10.1086/176997.
- Rees, M. J., 1990, *General principles of operation of the Cambridge Low Frequency Synthesis Telescope*. Relatório técnico, Mullard Radio Astronomy Observatory, Cambridge. MRAO Technical Note.
- Rengelink, R. B., Tang, Y., de Bruyn, A. G., et al., 1997, “The Westerbork Northern Sky Survey (WENSS)”, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, v. 124, pp. 259–280. doi: 10.1051/aas:1997117.

- Riley, J. M., Waldram, E. M., Riley, E., 1999, “Final release of the 7C 151-MHz survey catalogue”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 306, pp. 31–38.
- Saikia, D. J., Jamrozy, M., 2009, “Restarting Radio Activity in Active Galactic Nuclei”, *Bulletin of the Astronomical Society of India*, v. 37, pp. 63–85.
- Sargent, W. L. W., Young, P. J., Boksenberg, A., et al., 1978, “Dynamical evidence for a central mass concentration in the galaxy M87”, *The Astrophysical Journal*, v. 221, pp. 731–744. doi: 10.1086/156077.
- Schmidt, M., 1963, “3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift”, *Nature*, v. 197, n. 4872, pp. 1040–1040. doi: 10.1038/1971040a0.
- Schoenmakers, A. P., de Bruyn, A. G., Röttgering, H. J. A., et al., 2000a, “A New Sample of Giant Radio Galaxies from the Westerbork Northern Sky Survey”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 315, pp. 371–388. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03431.x.
- Schoenmakers, A. P., de Bruyn, A. G., Röttgering, H. J. A., et al., 2000b, “Radio galaxies with a ‘double-double morphology’- I. Analysis of the radio properties and evidence for interrupted activity in active galactic nuclei”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 315, n. 2 (06), pp. 371–380. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03430.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03430.x>>.
- Shen, X., Hopkins, P. F., Faucher-Giguère, C.-A., et al., 2020, “The bolometric quasar luminosity function at $z = 0-7$ ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 495, n. 3 (05), pp. 3252–3275. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/staa1381. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/staa1381>>.
- Shimwell, T. W., Röttgering, H. J. A., Best, P. N., et al., 2017, “The LOFAR Two-metre Sky Survey. I. Survey description and preliminary data release”, *Astron. Astrophys.*, 598:A104. doi: 10.1051/0004-6361/201629313.
- Shimwell, T. W., Hardcastle, M. J., Tasse, C., et al., 2022, “The LOFAR Two-metre Sky Survey. V. Second Data Release”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 659, pp. A1.
- Snellen, I. A. G., Schilizzi, R. T., Miley, G. K., et al., 1998, “The CORALZ sample of low-redshift compact steep-spectrum and gigahertz-peaked spectrum radio sources”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 319, pp. 14–26.

- Snellen, I. A. G., Schilizzi, R. T., Miley, G. K., et al., 2000, “On the evolution of young radio-loud AGN”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 319, n. 2 (dez.), pp. 445–456. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03935.x.
- Snellen, I. A. G., Mack, K.-H., Schilizzi, R. T., et al., 2004, “The low-luminosity population of compact radio sources at $z < 0.5$ ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 348, pp. 227–237.
- Son, D., Stawarz, , Cheung, C. C., 2012, “Spectral Turnover in CSS and GPS Sources”, *The Astrophysical Journal*, v. 748, pp. 81.
- Spencer, R. E., McDowell, J. C., Charlesworth, M., et al., 1989, “The Peacock & Wall 1.5-GHz sample. I – Radio structures”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 240, pp. 123–133.
- Stanghellini, C., O’Dea, C. P., Dallacasa, D., et al., 1998, “A complete sample of GPS radio sources – I. Spectral properties”, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 131, pp. 303–327.
- Stoche, J. T., others, 1991, “The Einstein Observatory Extended Medium-Sensitivity Survey. II. The Optical Identifications”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 76, pp. 813–874. doi: 10.1086/191582.
- Tengstrand, O., Guainazzi, M., Siemiginowska, A., et al., 2009, “Chandra Observations of CSS Radio Galaxies: Probing the Emission Mechanisms”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 501, pp. 89–102.
- Thompson, A. R., Moran, J. M., Swenson, G. W., 2017, *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Springer. doi: 10.1007/978-3-319-44431-4.
- Turner, R. J., Shabala, S. S., 2015, “Radio-Jet Duty Cycles: Intermittent Activity in Low-Power Radio Galaxies”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 451, pp. 699–712. doi: 10.1093/mnras/stv933.
- Turner, R. J., Rogers, J. G., Shabala, S. S., et al., 2018, “RAiSE II: resolved spectral evolution in radio AGN”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 473, n. 3, pp. 4179–4196.
- van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al., 2013, “LOFAR: The LOw-Frequency ARray”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 556, pp. A2. doi: 10.1051/0004-6361/201220873.
- Visser, H. C. D., van Duin, A. H., others, 1995, “7C survey data release: batch 2 analysis”, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, v. 114, pp. 113–127.

- Waldram, E. M., McGilchrist, M. M., 1990, “Beam-set method for source extraction in the 7C survey”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 246, pp. 305–318. doi: 10.1093/mnras/246.2.305.
- Waldram, E. M., Riley, J. M., 1993, “Automated integrated-flux estimation for the 7C survey fields”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 263, pp. 19–29. doi: 10.1093/mnras/263.1.19.
- Weedman, D. W., 1983, “Toward explaining Seyfert galaxies.” *Astrophys. J.*, v. 266 (mar.), pp. 479–484. doi: 10.1086/160796.
- Wilson, T. L., Rohlfs, K., Hüttemeister, S., 2013, *Tools of Radio Astronomy*. Springer. doi: 10.1007/978-3-642-39950-3.
- Zubovas, K., King, A. R., 2019, “The $M - \sigma$ relation between supermassive black holes and their host galaxies”, *General Relativity and Gravitation*, v. 51, n. 5 (maio). ISSN: 1572-9532. doi: 10.1007/s10714-019-2549-7. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10714-019-2549-7>>.

Apêndice A

Tabela de Fluxos

A.1 Tabela de Fluxos

A seguir, apresentamos a tabela com todos os fluxos de todos os levantamentos utilizados para a construção das SEDs.

Tabela A.1: Fluxos de rádio (em mJy/feixe) medidos em diferentes levantamentos para a amostra de galáxias. Os valores de fluxo são apresentados com suas incertezas.

ID	Nome	RA	Dec	LoTSS (144 MHz)	7C (151 MHz)	WENSS (325 MHz)	Texas (365 MHz)	FIRST (1400 MHz)	NVSS (1400 MHz)	VCLASS (3000 MHz)	GB6 (4850 MHz)
1	B2-0026+34	00:29:14.20	+34:56:32.00	173.01±1.53	x	1859.52±6.36	1450.79±1.18	1195.39±106.19	1141±3.6	x	1359.0±50.0
2	FBQSJ07411	07:41:10.70	+31:12:00.31	456.42±8.14	2051.25±0.88	2193.78±4.53	1662.67±6.28	2693.85±239.29	1196±3.7	853.0±26.7	1365.0±74.0
3	B3-0754+40	07:57:56.69	+39:59:36.01	143.11±1.27	98.01±0.15	96.85±0.60	33.31±0.17	30.00±4.00	349±3.3	x	347.0±22.0
4	4C+47.27	08:04:13.91	+47:04:43.07	2305.00±8.99	846.74±0.61	853.62±1.88	457.01±0.26	332.00±29.00	2549±5.5	3853.0±58.5	2365.0±92.0
5	4C+40.20	08:12:53.13	+40:19:00.09	3295.35±3.86	1058.58±0.32	1042.77±1.97	544.16±0.63	392.00±35.00	2710±3.6	3764.0±46.9	2636.0±33.0
6	2MASXJ0831	08:31:39.81	+46:08:00.75	27.99±0.26	124.23±0.17	128.16±0.73	93.82±0.14	98.00±9.00	66±4.2	x	x
7	2MASXJ0834	08:34:11.11	+58:03:21.45	24.46±0.08	50.64±0.17	55.44±0.57	31.03±0.11	57.00±6.00	43±4.7	x	x
8	B3-0833+44	08:36:37.83	+44:01:09.43	310.68±1.69	132.17±0.16	128.35±0.58	68.13±0.16	68.05±6.69	331±3.9	488.0±28.5	441.0±31.0
9	SDSSJ08382	08:38:25.00	+37:10:37.00	710.02±2.61	382.83±0.23	332.21±1.02	188.12±0.27	159.28±13.99	740±3.6	900.0±28.6	x
10	3C213.1	09:01:05.32	+29:01:46.46	2033.23±32.74	728.86±9.43	1927.80±4.23	368.43±1.57	1051.22±93.74	x	6853.0±129.5	4393.0±108.0
11	B3-0902+46	09:06:15.52	+46:36:18.98	76.41±0.16	306.56±0.21	283.38±1.87	153.21±0.36	162.49±14.31	279±5.4	x	378.0±37.0
12	3C216	09:09:33.50	+42:53:46.54	19377.28±8.49	3443.87±2.90	4036.96±8.13	1575.65±1.18	1659.78±147.70	14658±5.8	29286.0±403.9	13932.0±159.0
13	SDSS091734	09:17:34.81	+50:16:38.15	281.17±0.71	103.79±0.17	107.54±0.47	52.54±0.19	45.97±5.89	250±4.5	375.0±20.3	x
14	FBQSJ09452	09:45:25.88	+35:21:03.46	784.06±1.07	140.20±0.19	152.57±0.64	61.71±0.16	37.79±4.50	523±3.5	923.0±36.1	489.0±22.0
15	4C+39.29	10:17:14.18	+39:01:22.79	3791.45±16.12	1096.25±5.93	1358.35±5.15	487.59±1.32	446.52±39.22	3680±3.4	5452.0±63.6	3807.0±60.0
16	2MASXJ1026	10:26:18.27	+45:42:29.45	71.69±0.25	101.23±0.17	98.66±0.63	89.76±0.14	51.71±5.39	136±4.5	x	x
17	4C+39.32	10:28:44.30	+38:44:36.67	2490.63±2.30	643.51±0.36	635.08±8.99	294.81±0.40	207.16±17.98	1885±3.4	2813.0±35.4	1975.0±64.0
18	SDSSJ10350	10:35:07.06	+56:28:46.82	638.14±1.29	1744.31±2.20	1740.09±4.40	1332.94±0.98	1334.96±119.03	1467±3.7	878.0±17.8	1773.0±62.0
19	UGC05771	10:37:19.34	+43:35:15.07	218.03±0.67	125.43±0.16	128.63±0.54	106.20±0.17	66.00±7.00	253±4.1	274.0±10.8	231.0±18.0
20	4C+30.19	10:40:29.96	+29:57:57.98	2114.13±1.46	363.45±0.20	385.85±1.05	132.58±0.22	118.25±11.05	1422±3.1	2078.0±39.4	1293.0±38.0
21	2MASSJ1056	10:56:28.21	+50:19:52.24	350.66±1.31	78.61±0.15	84.93±0.55	41.01±0.13	31.62±3.95	254±3.7	424.0±14.4	240.0±19.0
22	WISEJ111036	11:10:36.31	+48:17:52.54	324.42±0.70	521.75±0.45	520.54±1.04	250.27±0.76	231.00±21.00	592±3.5	411.0±14.1	695.0±49.0
23	B3-1128+455	11:31:38.92	+45:14:51.00	4397.25±5.21	1957.59±1.65	1918.39±3.58	952.31±1.30	615.21±54.20	5326±4.4	6561.0±54.9	5046.0±84.0
24	4C+46.23	11:43:39.86	+46:21:23.57	1729.42±13.87	320.67±4.10	827.44±1.57	48.46±0.47	184.07±16.01	3161±4.4	5538.0±75.6	2941.0±59.0
25	[HB89]1153	11:56:18.74	+31:28:04.75	7374.44±8.95	2852.14±1.00	2910.06±5.82	1257.66±2.00	1126.88±100.03	7314±3.4	7957.0±219.2	7197.0±65.0
26	B3-1154+435	11:57:27.60	+43:18:06.77	1135.66±1.38	246.67±0.18	250.19±0.83	131.31±0.17	105.66±9.97	754±3.6	1329.0±30.8	691.0±20.0
27	B2-1201+39	12:04:06.86	+39:12:18.21	1517.86±1.72	438.75±0.25	468.11±1.27	162.89±0.21	152.01±13.73	1359±2.9	1925.0±47.6	1343.0±23.0
28	3C268.3	12:06:24.70	+64:13:37.00	12157.27±3.77	x	3595.63±7.34	1506.84±0.91	1244.00±110.00	10517±4.5	14445.0±121.4	11273.0±200.0
29	B3-1206+415	12:09:02.80	+41:15:59.41	78.89±0.21	145.00±0.17	142.92±0.47	112.54±0.17	x	189±2.9	x	x
30	B3-1241+411	12:44:19.99	+40:51:37.22	1036.42±2.24	345.64±0.44	348.69±1.13	177.24±0.24	161±15	902±3.9	1330.0±34.2	x
31	B3-1242+410	12:44:49.20	+40:48:06.35	924.95±2.01	1329.27±0.48	1337.11±2.26	809.54±0.49	720.00±64.00	2152±3.9	1418.0±38.7	2039.0±55.0
32	4C+49.25	12:47:07.37	+49:00:18.27	2265.21±2.80	1037.48±0.80	1177.90±2.31	537.17±0.49	566.00±50.61	2467±3.4	3244.0±52.3	2485.0±65.0

ID	Nome	RA	Dec	LoTSS (144 MHz)	7C (151 MHz)	WENSS (325 MHz)	Texas (365 MHz)	FIRST (1400 MHz)	NVSS (1400 MHz)	VCLASS (3000 MHz)	GB6 (4850 MHz)
33	SBS1250+568	12:52:26.32	+56:34:19.65	8833.98±2.69	2263.82±1.01	2246.50±5.03	903.12±0.57	864.29±77.04	6861±3.6	10780.0±264.2	7444.0±172.0
34	B3-1308+451	13:10:56.99	+44:51:46.61	393.34±1.03	96.35±0.19	100.08±1.32	44.47±0.15	34.00±5.00	341±3.5	562.0±32.1	293.0±17.0
35	B3-1315+41	13:17:39.21	+41:15:45.98	5.42±0.20	246.82±0.31	256.09±2.31	228.28±0.51	165.52±14.43	58±5	93±9	x
36	3C286	13:31:08.28	+30:30:32.95	20326.19±5.05	14777.68±4.16	14358.02±25.80	9202.01±8.49	5772.73±513.64	27124±4.5	x	27475.0±767.0
37	4C+62.22	14:00:28.69	+62:10:38.41	1500.16±1.68	4255.91±3.60	4198.67±8.43	2230.90±1.72	1905.21±169.12	5530±3.9	1335.0±44.9	5564.0±74.0
38	2MASXJ1400	14:00:51.62	+52:16:06.61	392.73±1.51	169.66±0.36	168.02±1.05	94.27±0.13	65.33±6.12	396±4.0	x	456.0±22.0
39	B3-1402+415	14:04:16.30	+41:17:49.00	322.88±0.68	209.33±0.20	212.45±1.33	127.95±0.17	44.42±4.26	444±2.9	270.0±32.1	366.0±26.0
40	MRK0668	14:07:00.39	+28:27:14.78	73.28±0.31	818.75±0.33	798.28±1.85	1680.06±0.98	2127.87±189.00	x	x	179.0±32.0
41	2MASXiJ140	14:09:42.46	+36:04:16.00	73.66±0.23	140.52±0.17	140.69±0.57	72.26±0.13	39.37±4.37	227±3.5	x	233.0±19.0
42	SDSSJ14132	14:13:27.21	+55:05:29.29	102.48±0.44	125.56±0.18	122.63±0.84	54.75±0.12	26.57±3.22	306±3.5	x	x
43	B3-1412+461	14:14:14.85	+45:54:48.79	73.38±0.42	396.40±0.36	419.84±1.06	265.32±0.26	219.72±19.42	360±3.5	x	401.0±50.0
44	2MASXJ1435	14:35:21.68	+50:51:22.81	244.22±1.10	137.91±0.16	141.82±0.56	83.24±0.12	65.68±6.26	291±3.3	375.0±43.1	265.0±20.0
45	B3-1445+410	14:47:12.73	+40:47:45.65	565.00±2.82	122.46±0.84	393.77±1.48	25.94±0.17	145.57±13.59	1085±3.8	1720.0±38.7	859.0±20.0
46	2MASXJ1530	15:30:16.24	+37:58:31.16	15.99±0.19	98.28±0.18	102.24±0.42	116.31±0.14	159.38±14.58	26±3.6	x	x
47	B2-1542+39	15:43:49.50	+38:56:01.00	946.87±1.38	188.75±0.15	176.90±0.61	70.55±0.13	51.61±5.27	726±3.4	1197.0±32.4	617.0±21.0
48	SDSSJ15504	15:50:43.90	+45:36:24.00	10.77±0.09	52.37±0.15	48.22±0.48	69.56±0.14	82.00±8.00	x	x	x
49	2MASSJ1559	15:59:27.66	+53:30:54.66	1098.67±1.29	170.18±0.17	178.07±0.85	63.27±0.14	57.49±5.95	759±4.0	1301.0±45.5	700.0±28.0
50	4C+52.37	16:02:46.39	+52:43:58.66	1204.94±0.98	557.22±0.36	556.59±1.26	278.53±0.16	246.01±21.29	1405±3.9	1641.0±48.1	1190.0±28.0
51	4C+40.34	16:11:48.55	+40:40:20.90	2567.46±7.97	553.30±0.20	536.07±1.14	261.45±0.18	168.63±15.24	1970±3.7	3145.0±71.0	1670.0±33.0
52	SDSSJ16431	16:43:11.35	+31:56:18.04	540.84±0.80	112.56±0.14	117.81±0.44	51.18±0.15	33.09±4.04	396±4.7	632.0±29.0	407.0±21.0

Apêndice B

Imagens LoTSS das 52 fontes utilizadas neste trabalho

B.1 Imagens LoTSS

A seguir apresentam-se as imagens LoTSS correspondentes à amostra completa utilizada neste trabalho.

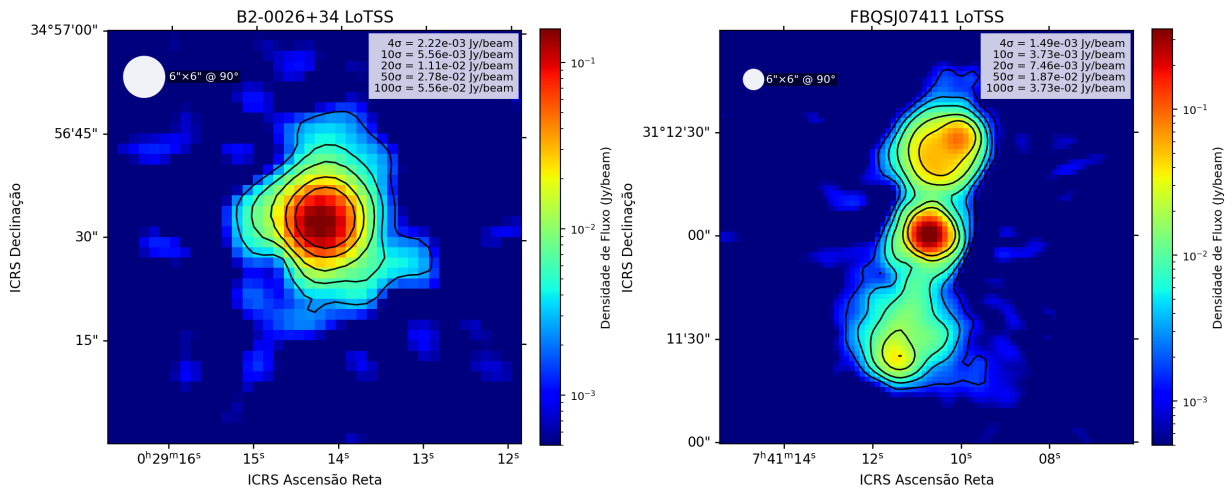
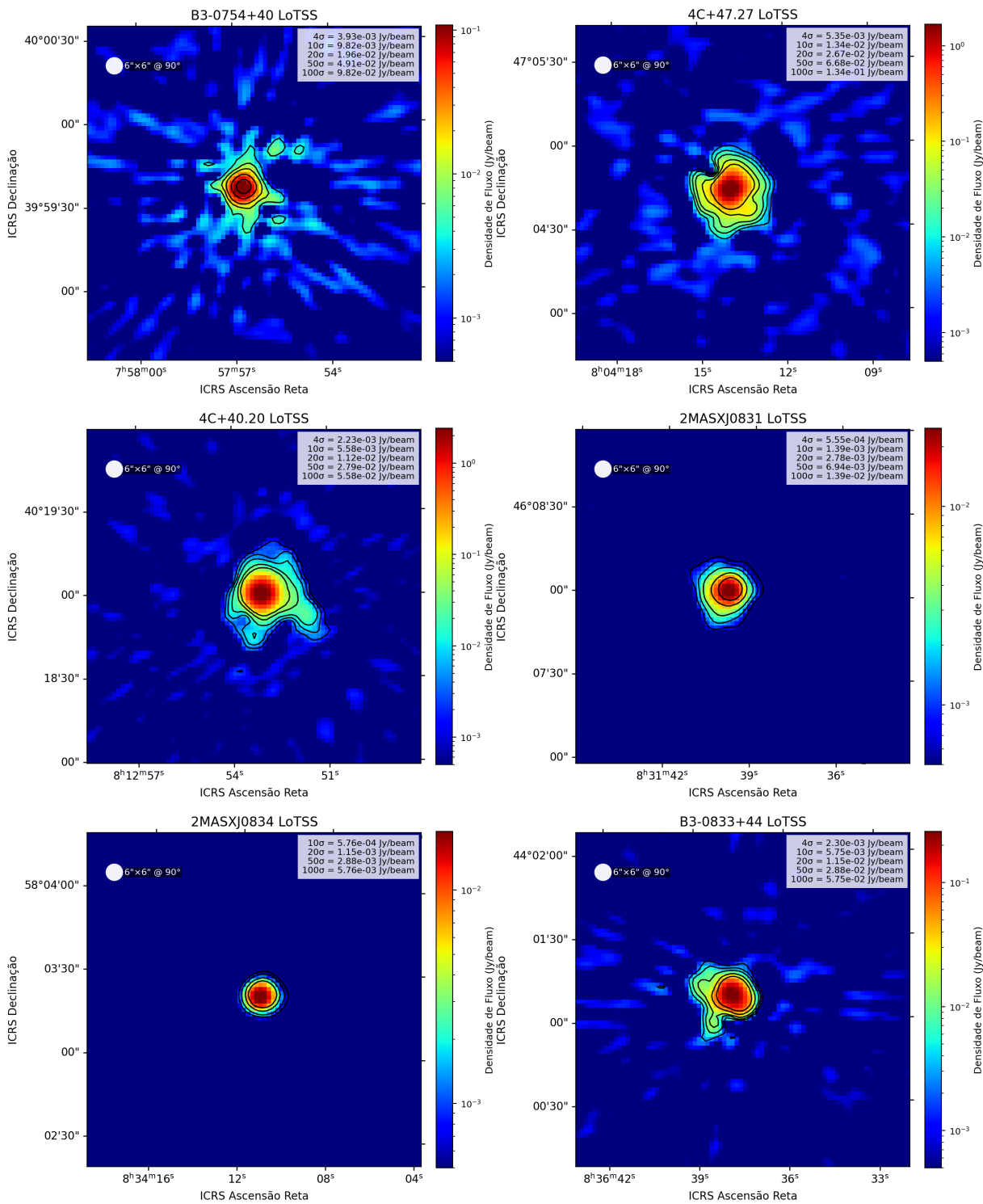
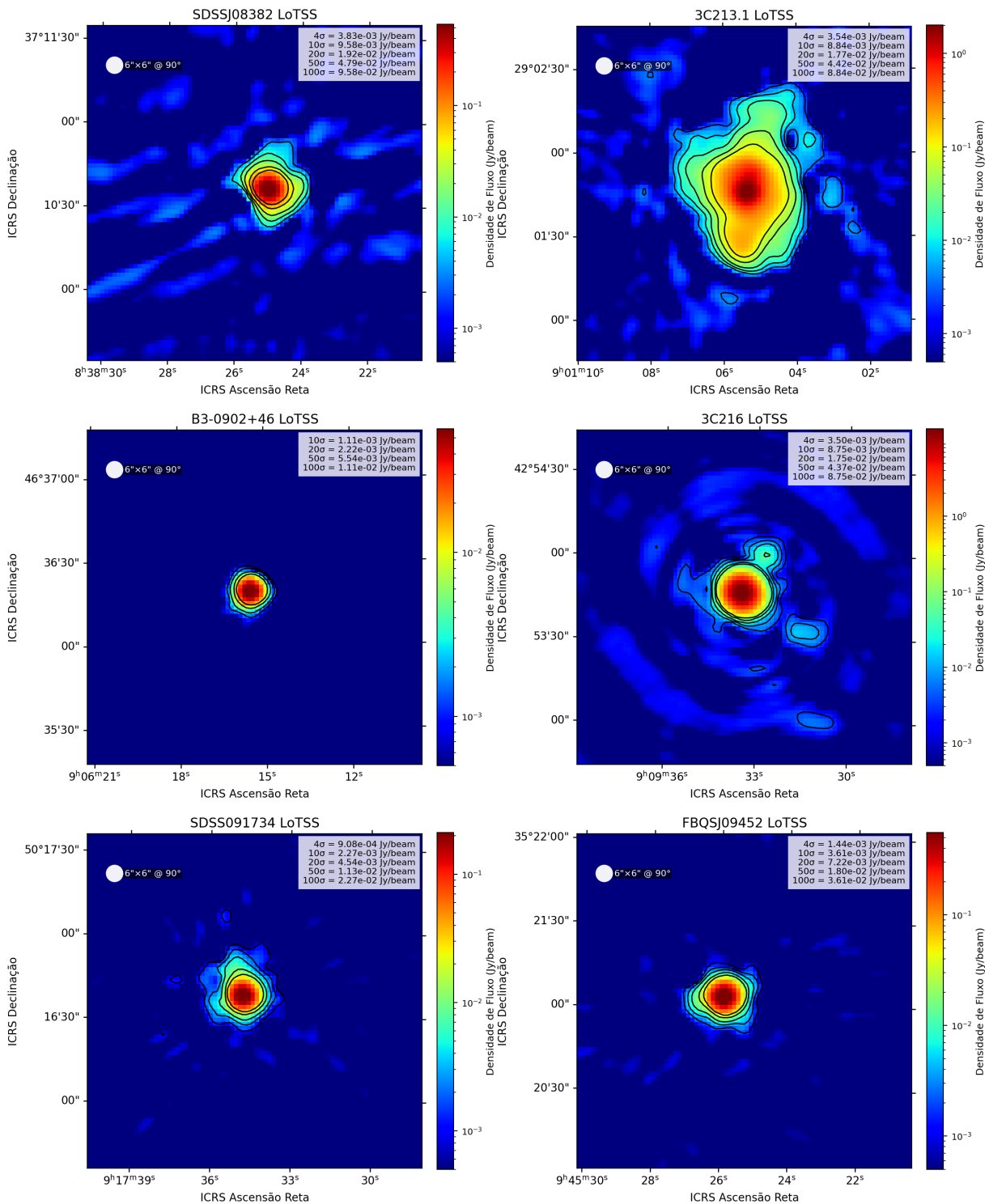


Figura B.1: Imagens LoTSS estudadas neste trabalho. Em todos os painéis o círculo branco representa o feixe do LOFAR e a legenda no canto superior direito os níveis de contorno plotados.

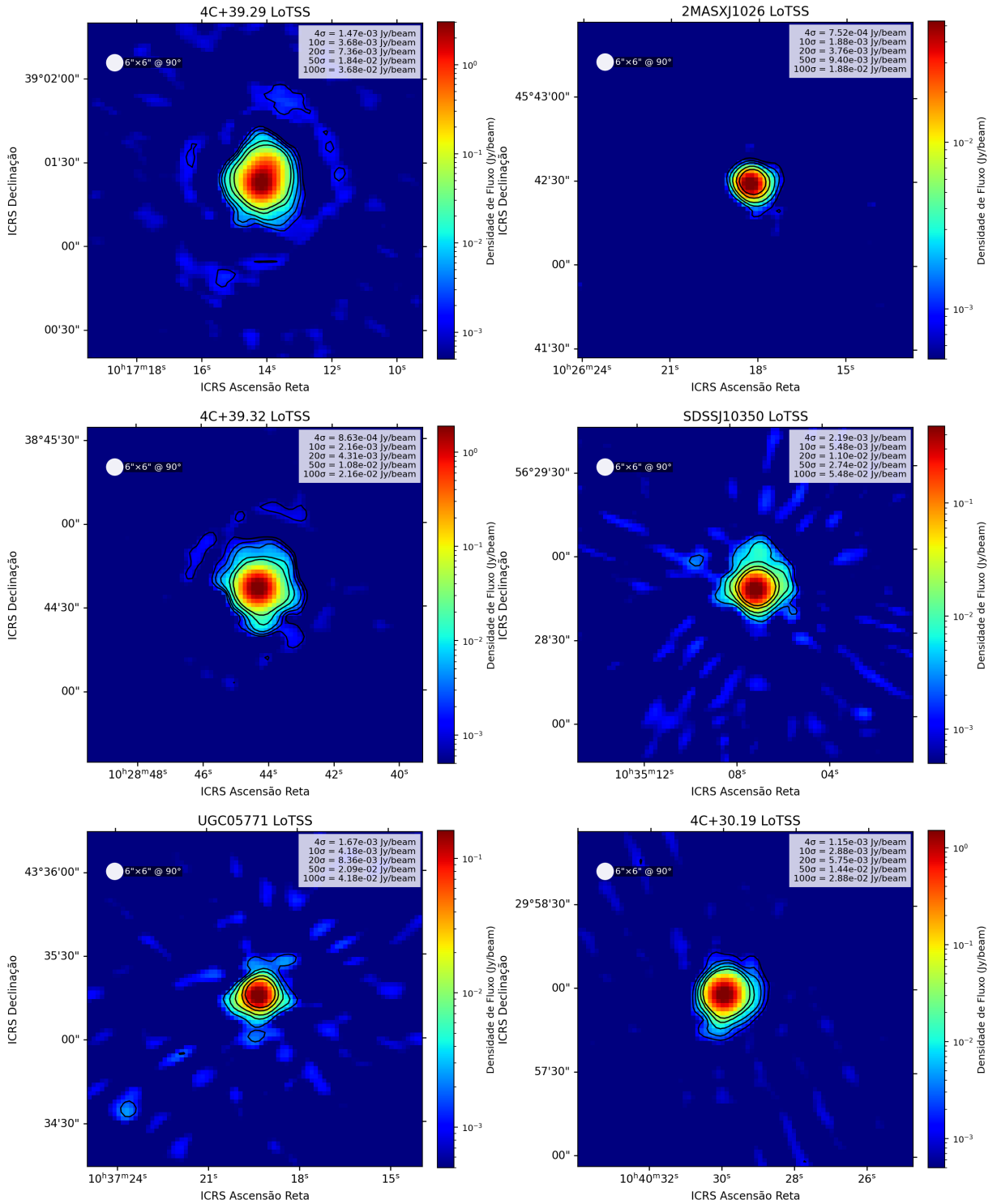
APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO 79



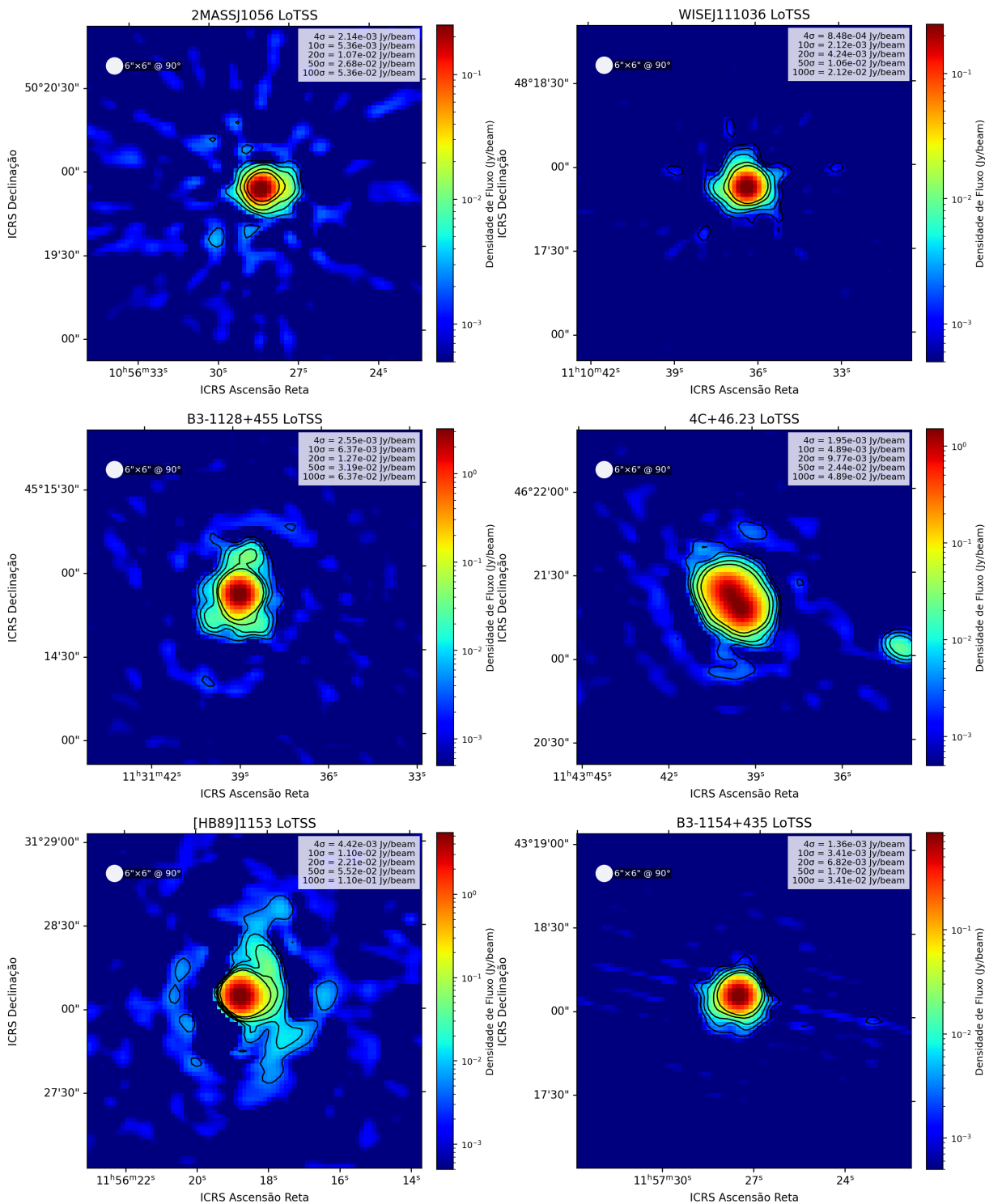
APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO⁸⁰



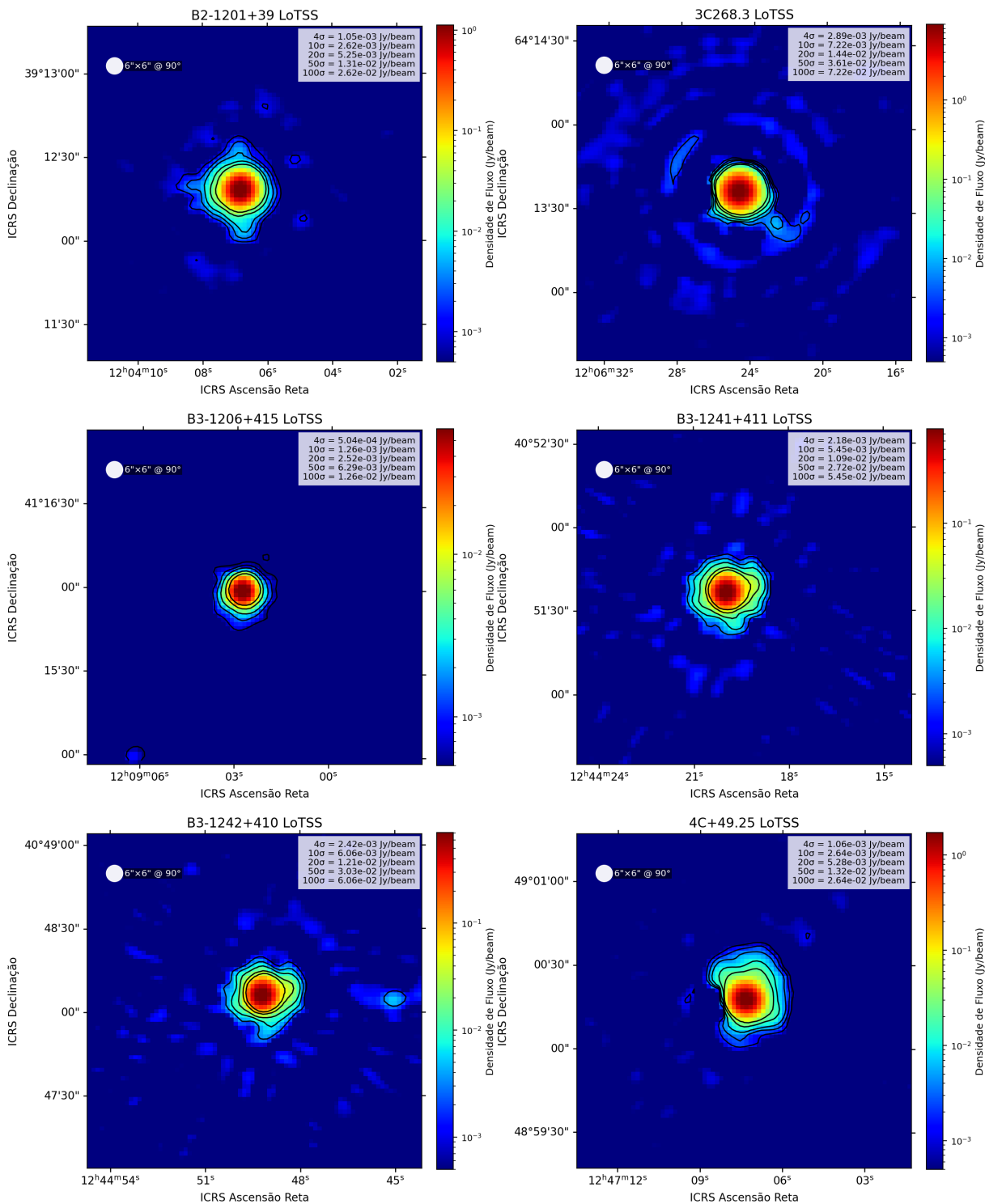
APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO⁸¹



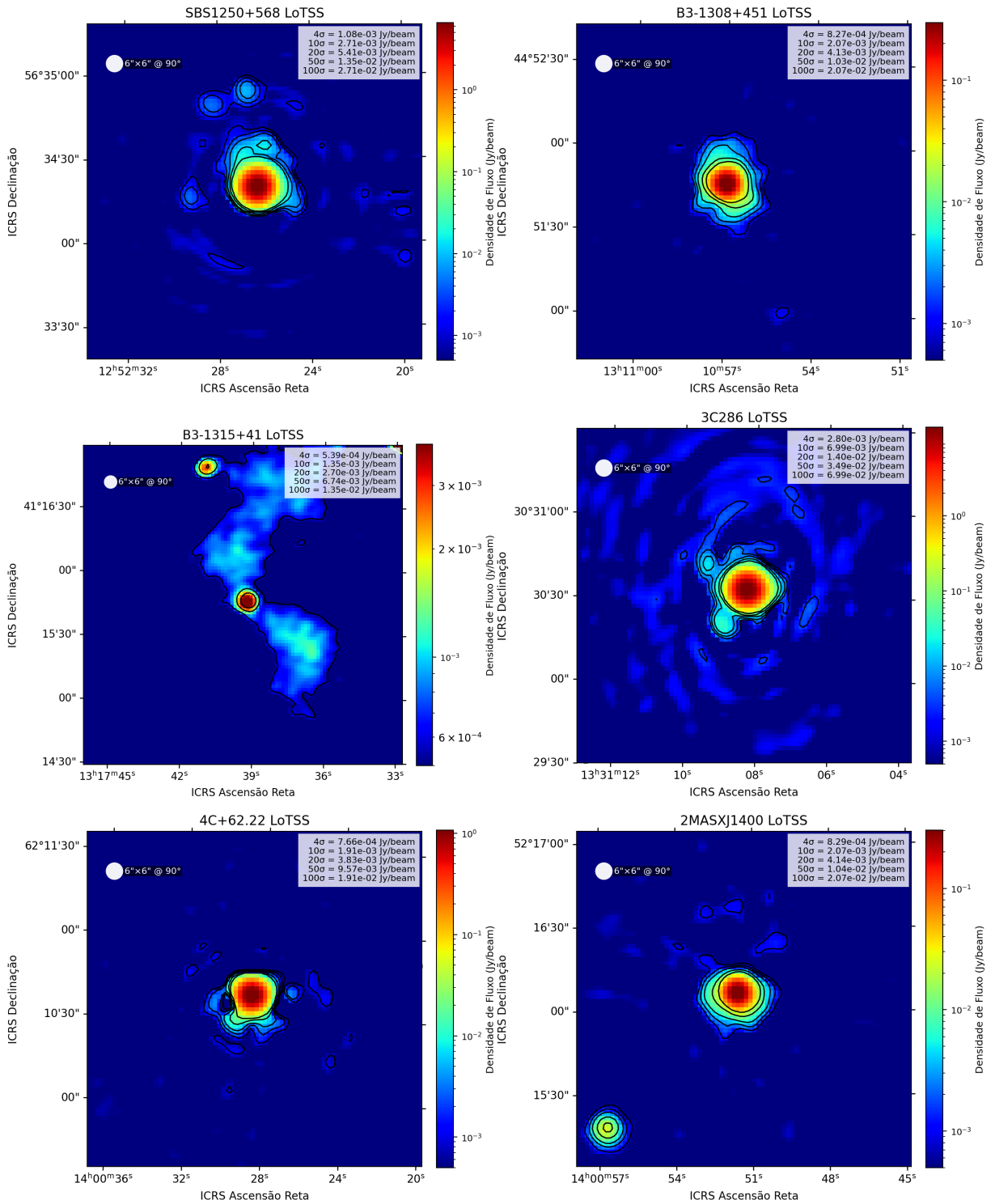
APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO⁸²



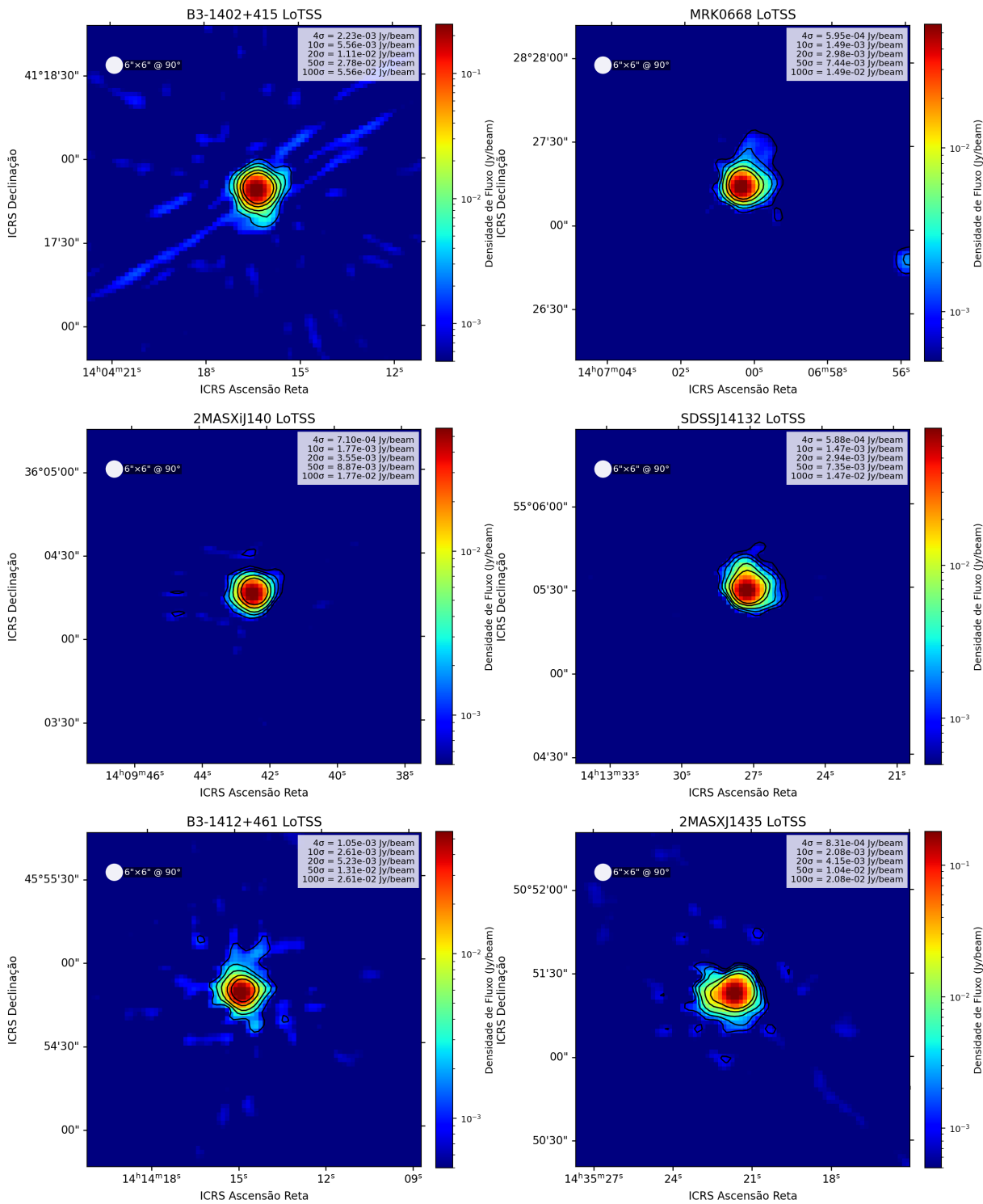
APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO⁸³



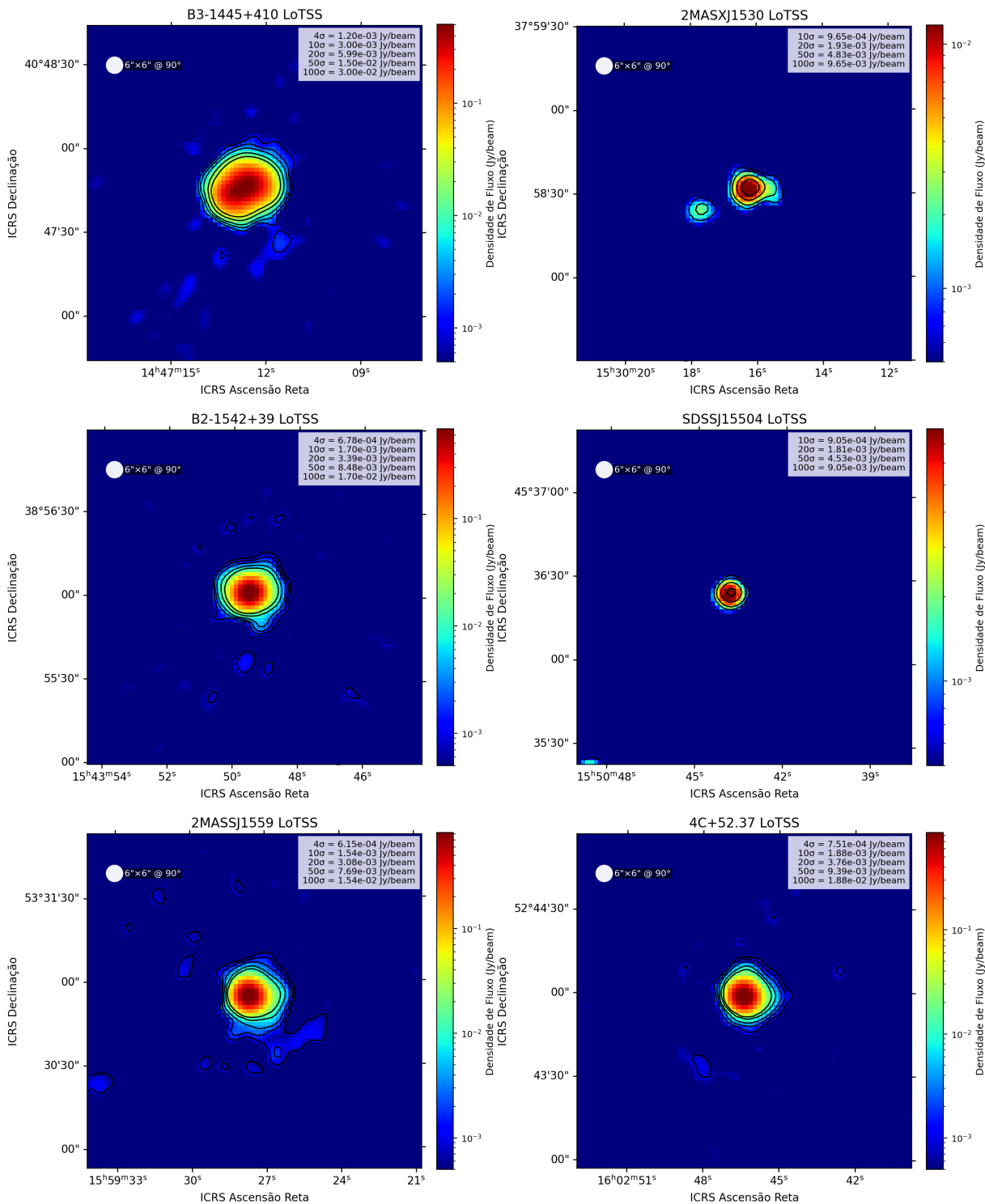
APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO⁸⁴



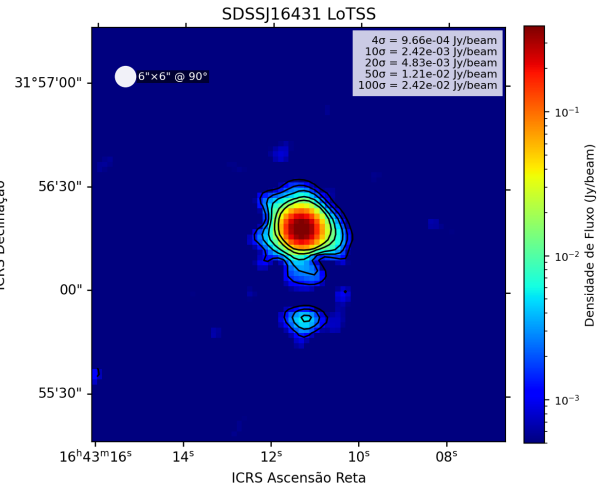
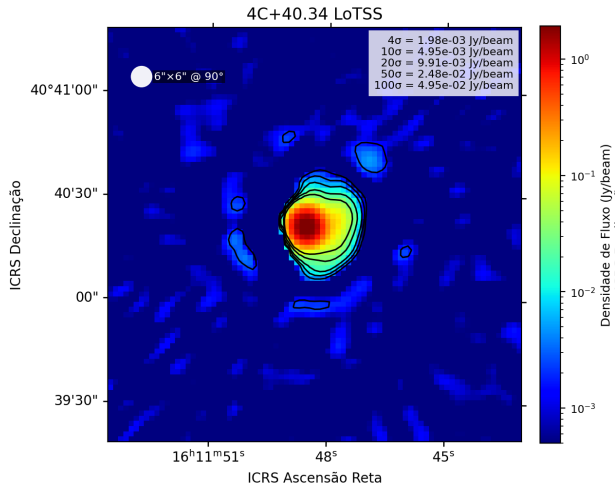
APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO⁸⁵



APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO⁸⁶



APÊNDICE B. IMAGENS LOTSS DAS 52 FONTES UTILIZADAS NESTE TRABALHO87



Apêndice C

Imagens FIRST com contornos LoTSS

C.1 Imagens FIRST + LoTSS

A seguir apresentam-se as imagens FIRST com contornos LoTSS sobrepostos, correspondentes à amostra completa utilizada neste trabalho.

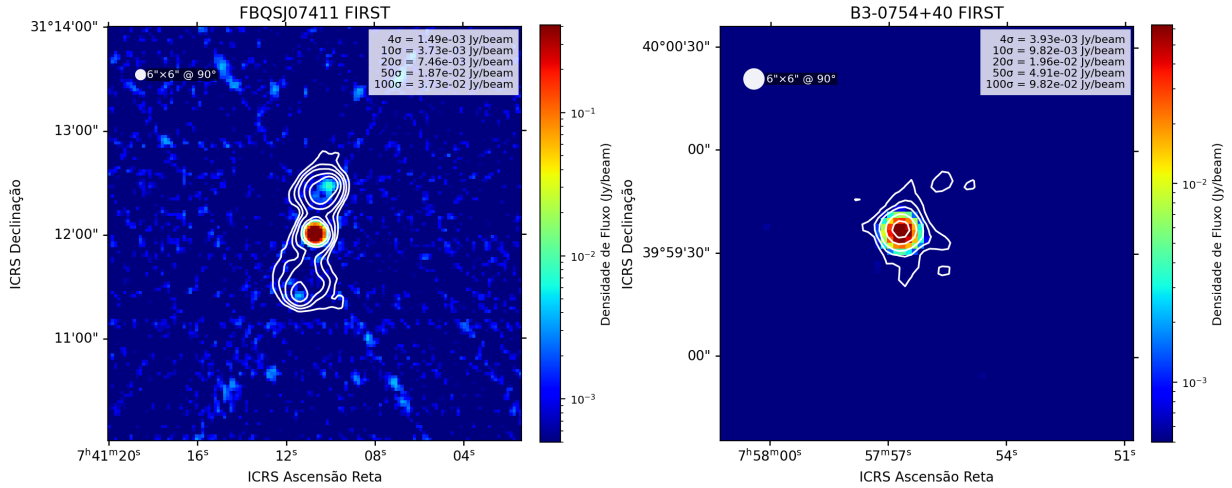
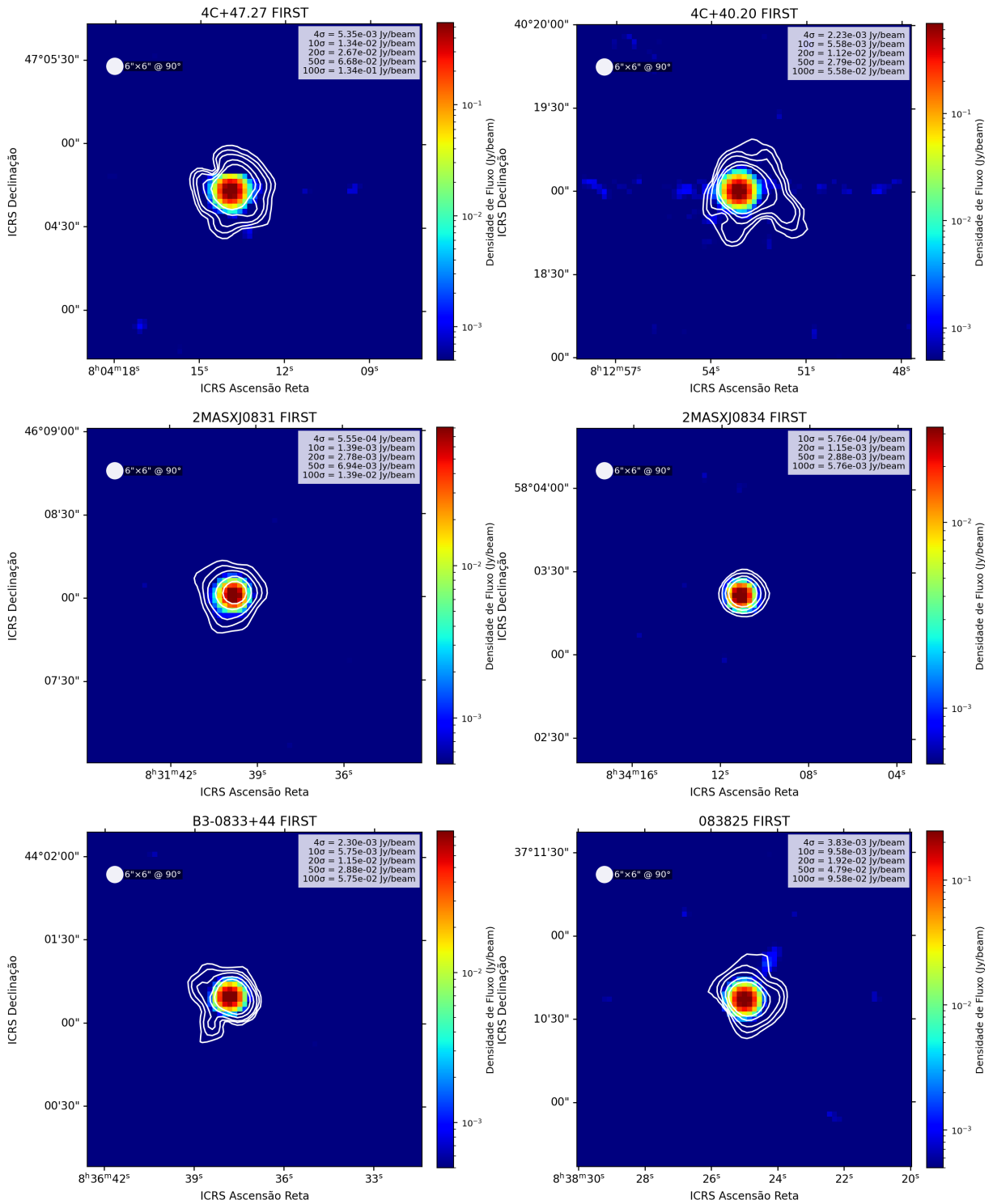
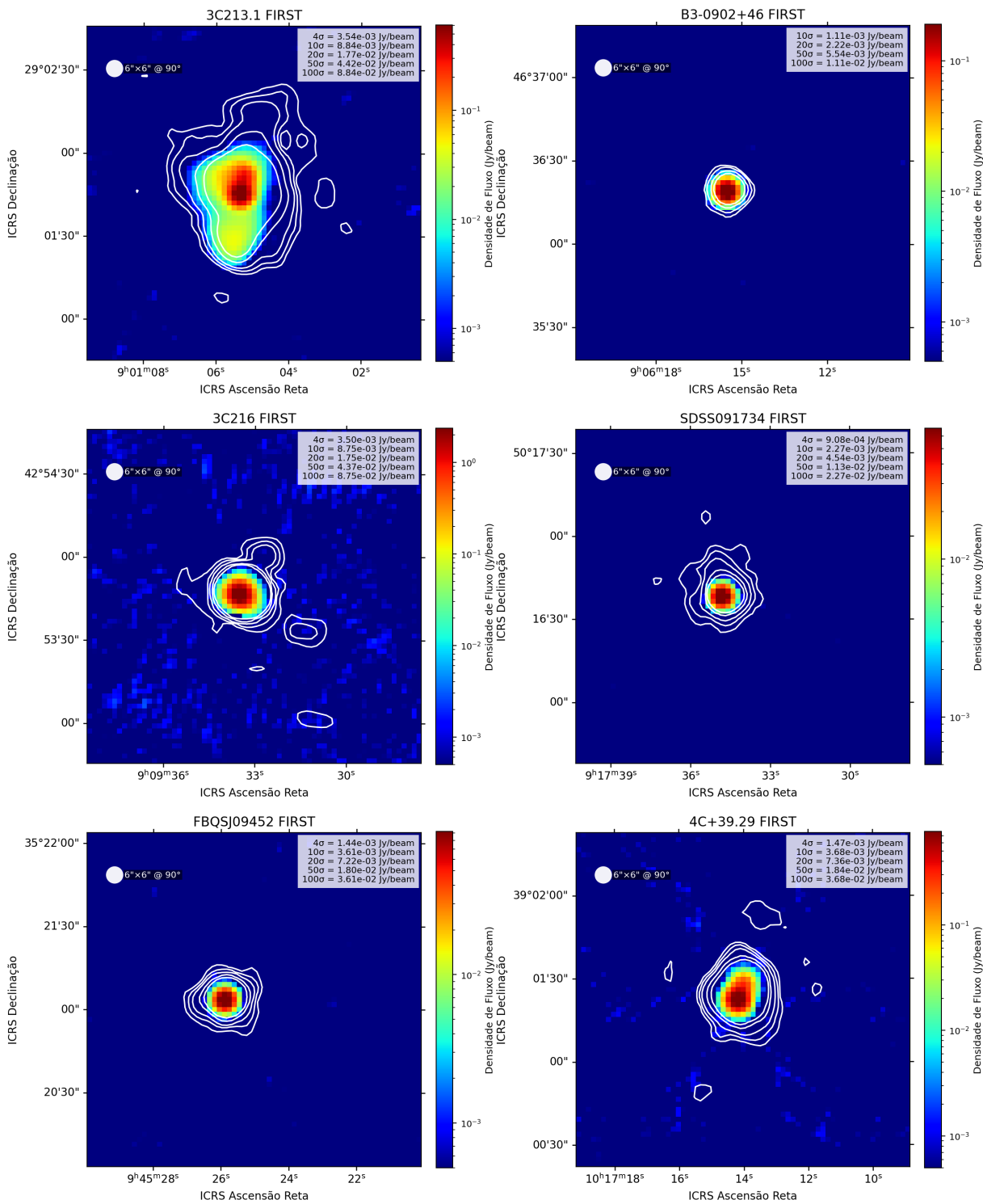
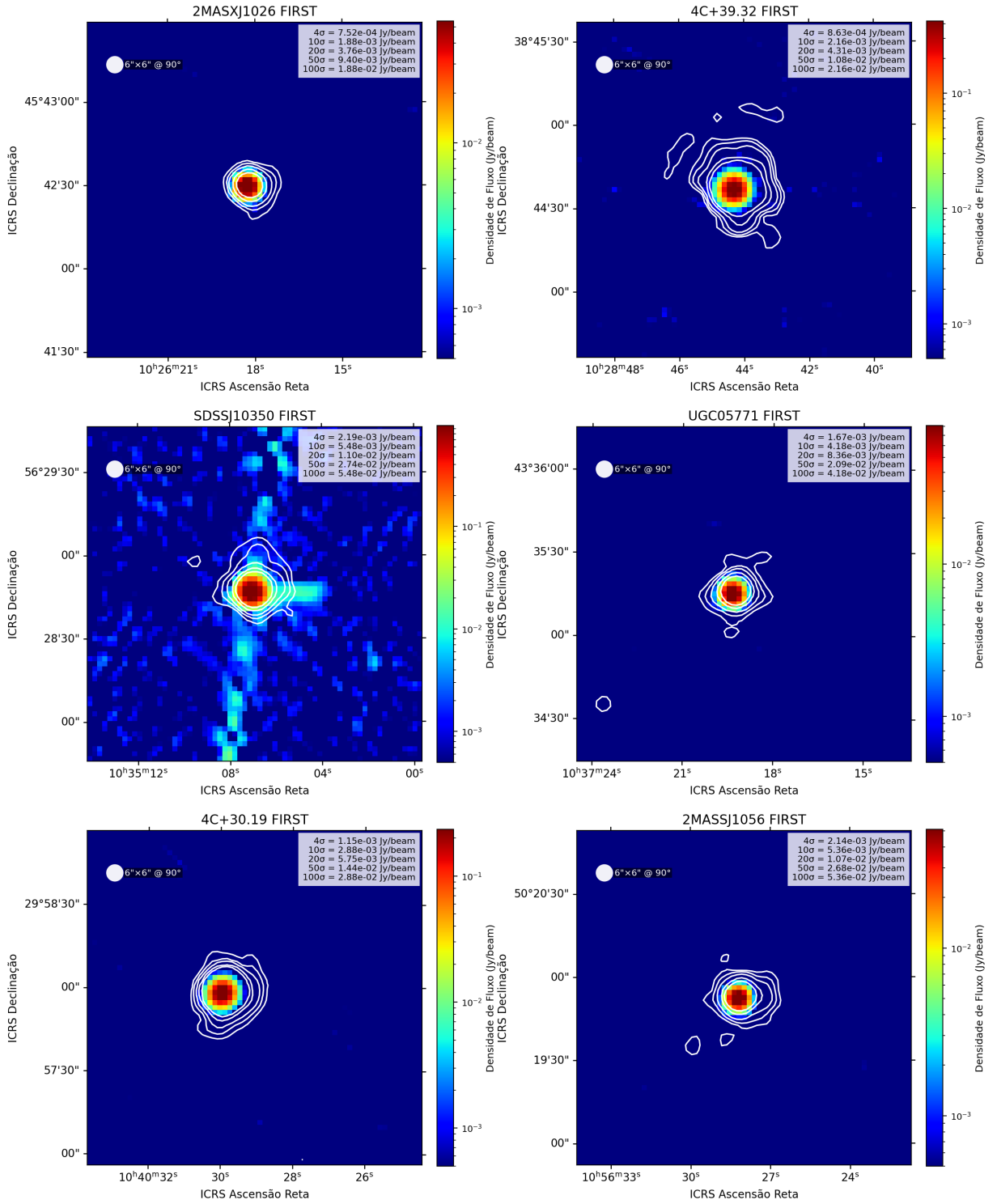
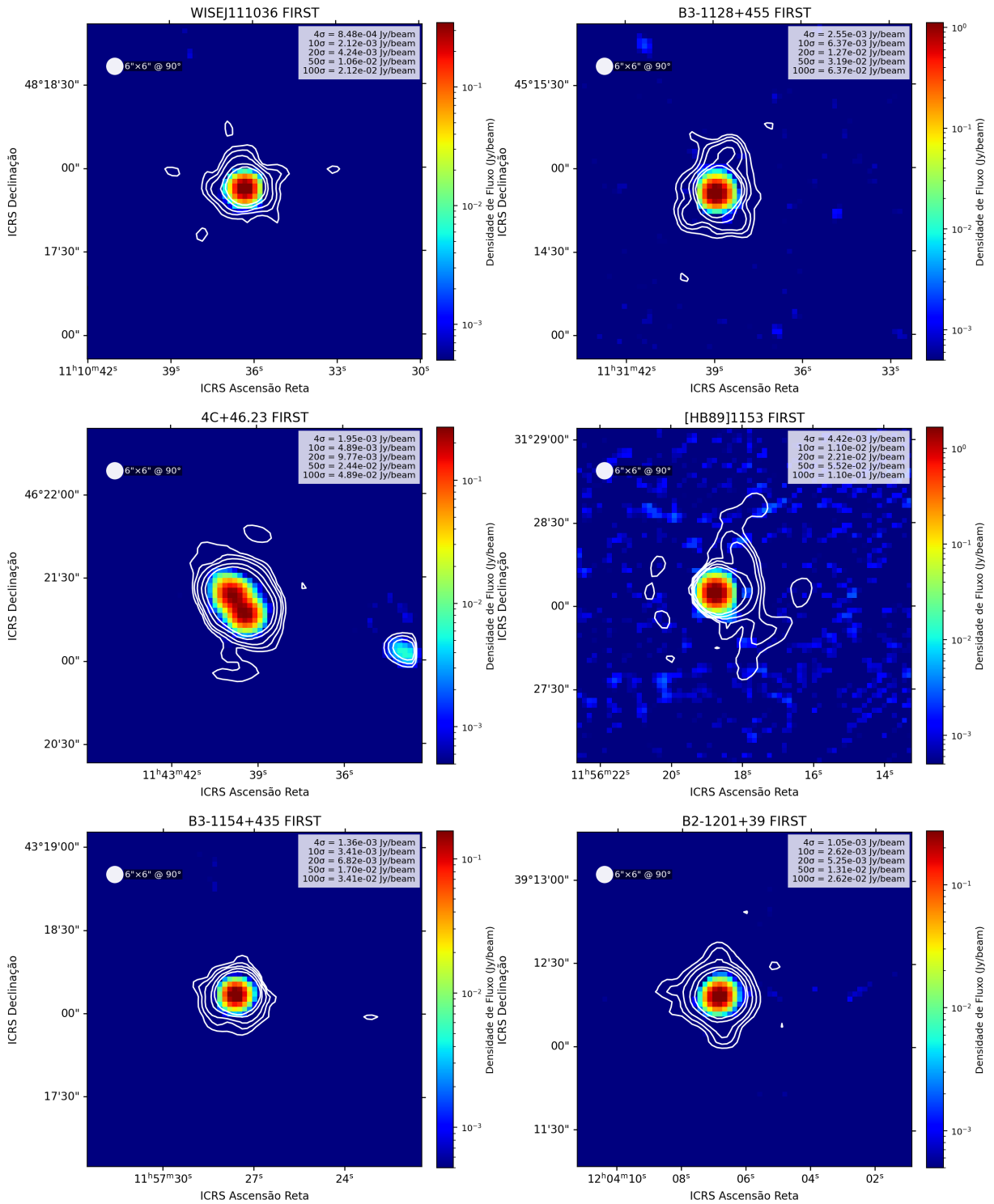


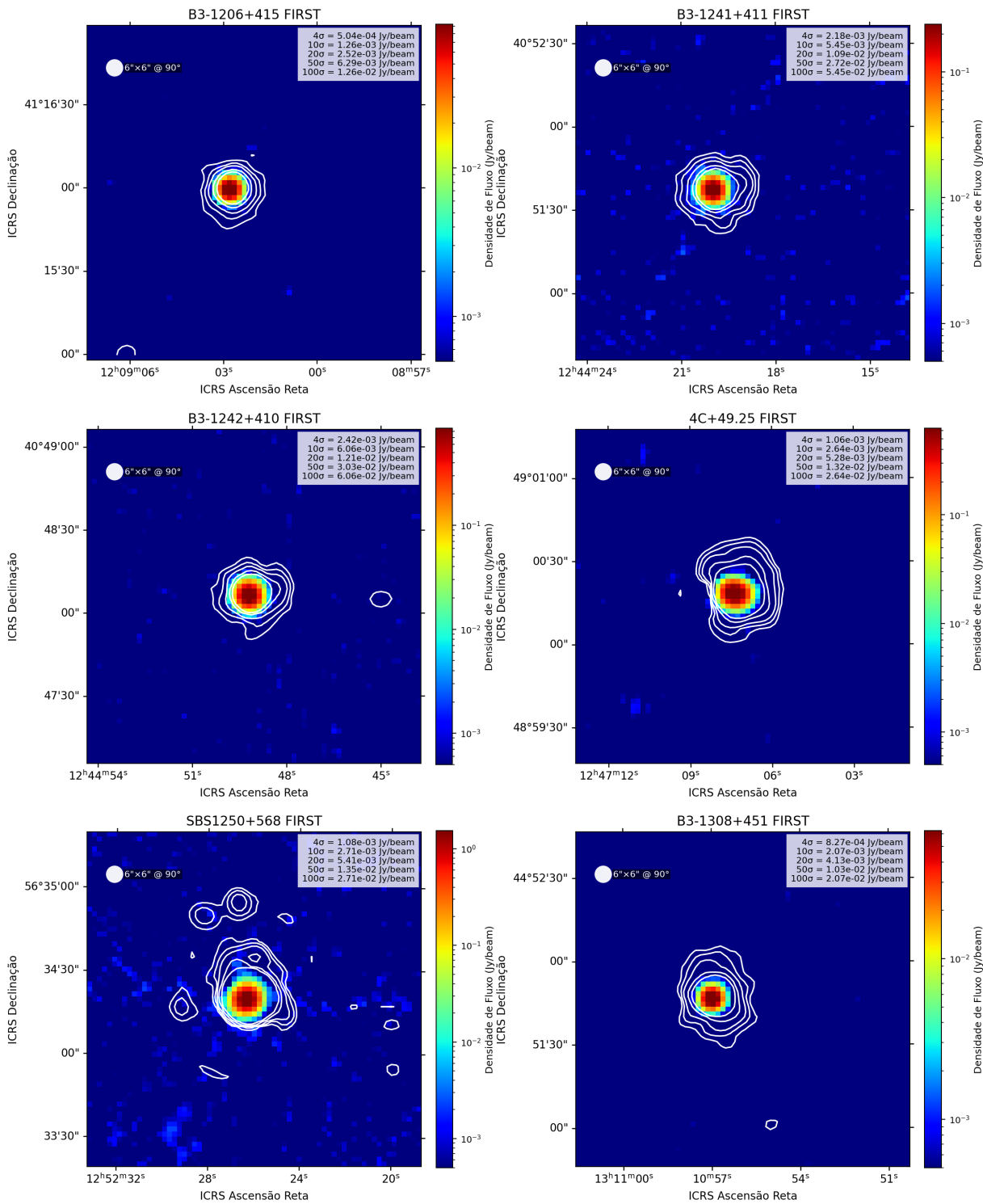
Figura C.1: Imagens FIRST com os contornos LoTSS sobrepostos. Em todos os painéis o círculo branco representa o feixe do LOFAR e a legenda no canto superior direito os níveis de contorno plotados.

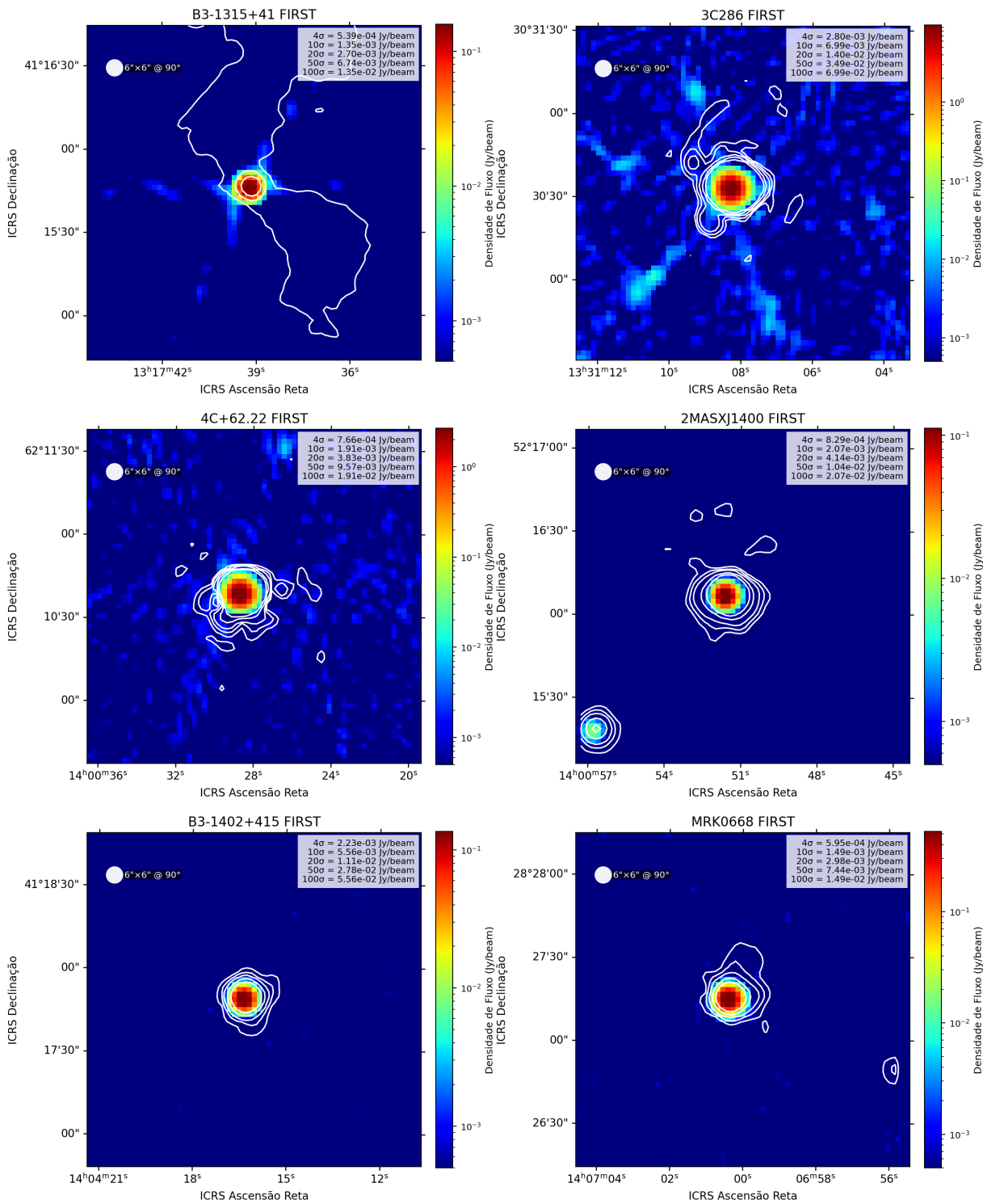


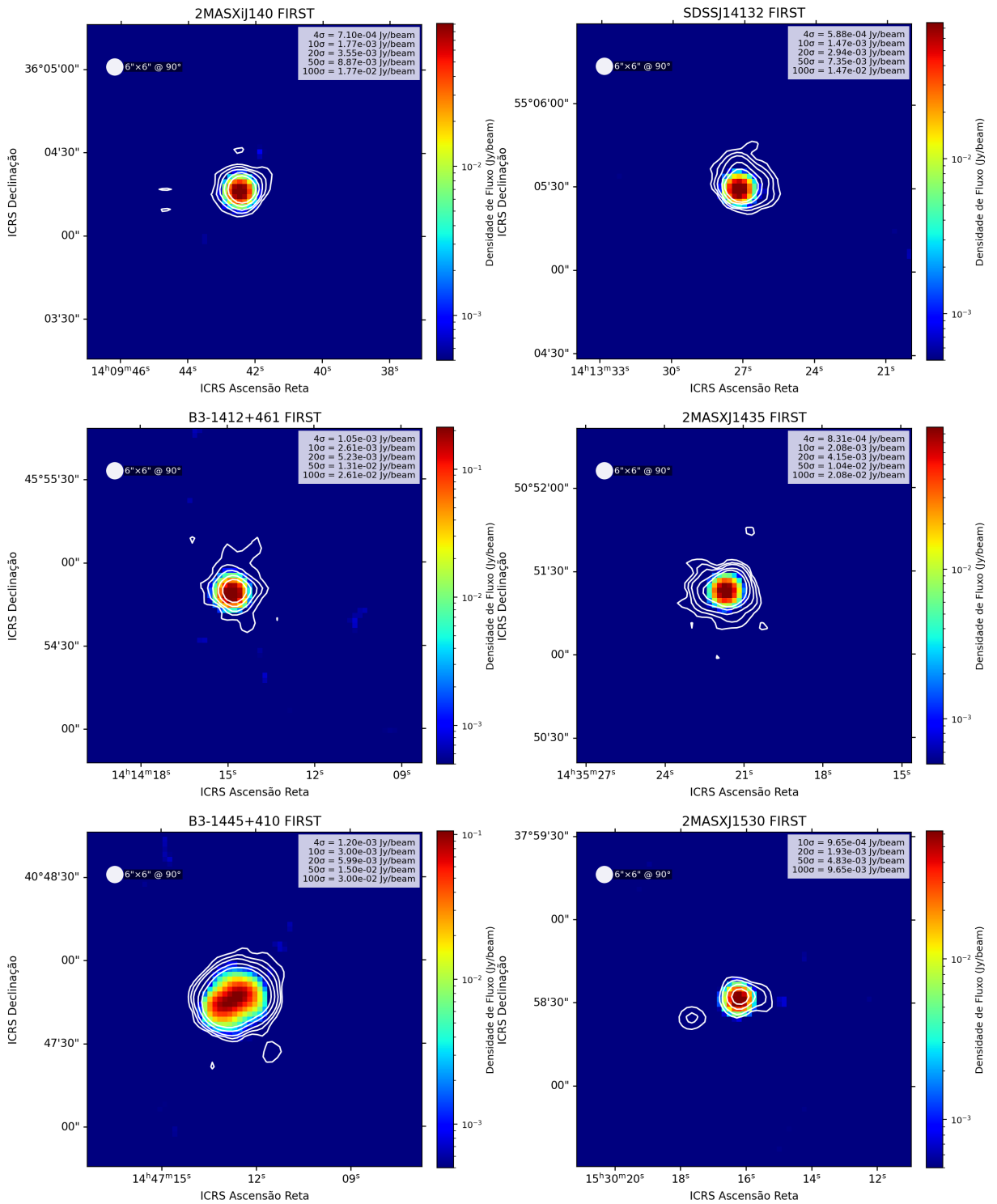


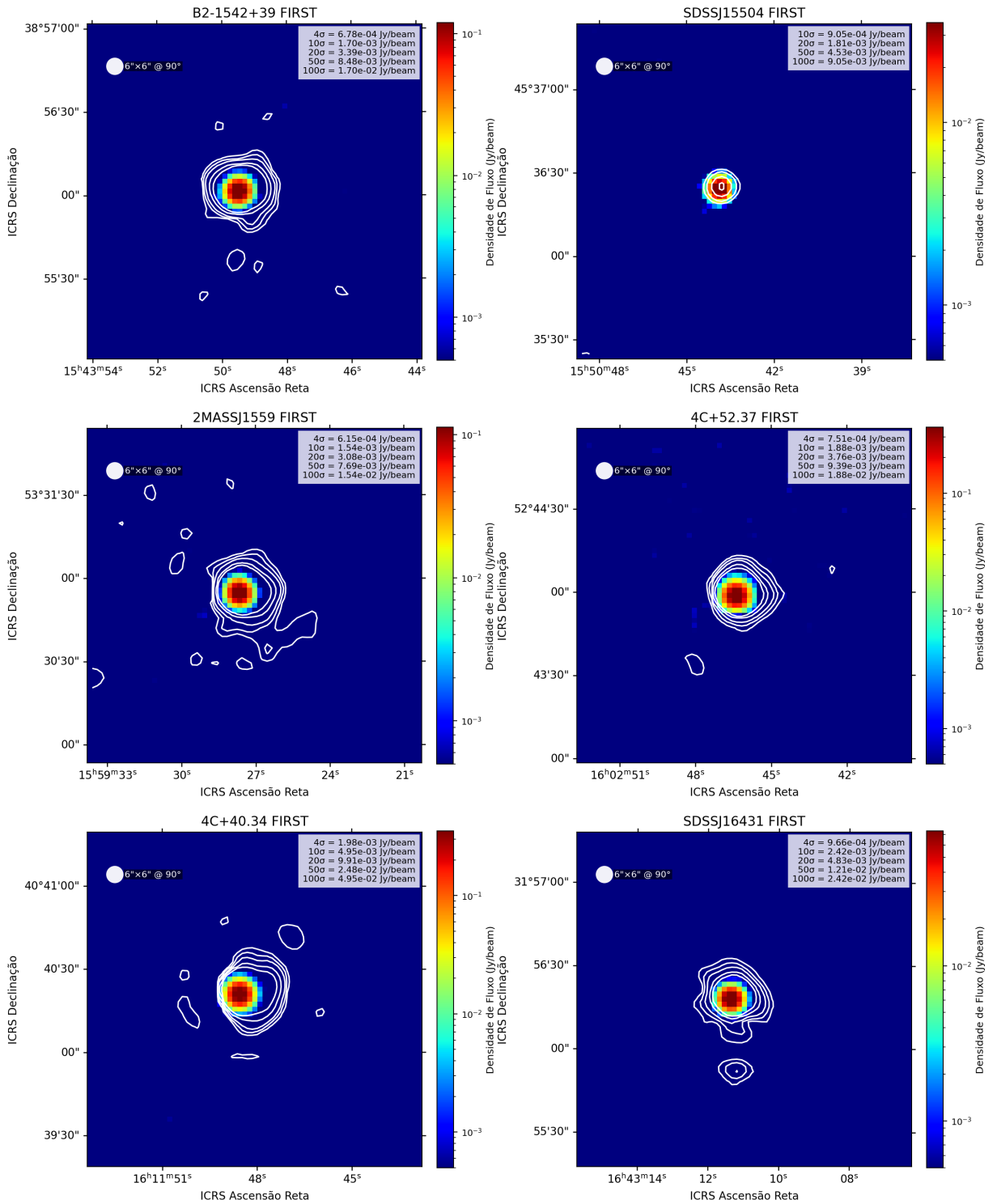












Apêndice D

SED das 52 fontes estudadas neste trabalho

D.1 Distribuição Espectral de Energia (SEDs)

A seguir apresentam-se as SEDs correspondentes à amostra completa utilizada neste trabalho. Ambos os eixos estão em escala logarítmica.

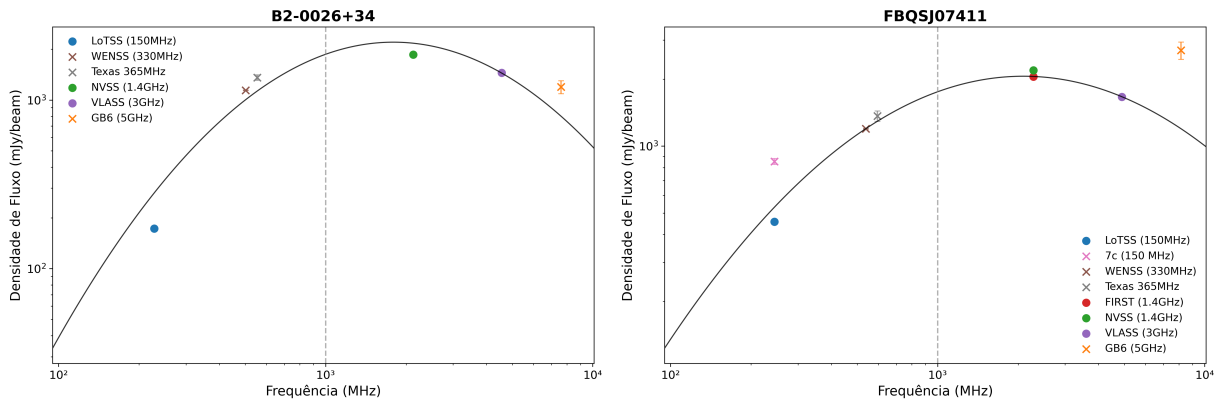


Figura D.1: As SEDs das 52 fontes estudadas neste trabalho, os eixos estão em escala logarítmica. A linha vertical tracejada indica a marca de 1 GHz. A legenda dentro de cada painel mostram os pontos multi-frequência utilizados na construção da respectiva SED.

