



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-13269-MAN/45

**DESCONTAMINAÇÃO DOS MAPAS DA RADIAÇÃO
CÓSMICA DE FUNDO FEITOS PELO SATÉLITE WMAP
UTILIZANDO DADOS DO RADIOTELESCÓPIO GEM**

Carla Martins Coelho

Dissertação de Mestrado em Astrofísica, orientada pelo Prof. Dr. Carlos Alexandre
Wuensche de Souza e pelo Prof. Dr. Armando B. Bernui Leo.

INPE
São José dos Campos
2008

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.: (012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr. Demétrio Bastos Netto - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dra. Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Anselmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Vinicius da Silva Vitor - Serviço de Informação e Documentação (SID) - bolsista

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva e Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-13269-MAN/45

**DESCONTAMINAÇÃO DOS MAPAS DA RADIAÇÃO
CÓSMICA DE FUNDO FEITOS PELO SATÉLITE WMAP
UTILIZANDO DADOS DO RADIOTELESCÓPIO GEM**

Carla Martins Coelho

Dissertação de Mestrado em Astrofísica, orientada pelo Prof. Dr. Carlos Alexandre
Wuensche de Souza e pelo Prof. Dr. Armando B. Bernui Leo.

INPE
São José dos Campos
2008

00.000.00(000.0)

Coelho,. C. M..

Descontaminação dos Mapas da Radiação Cósmica de Fundo Feitos Pelo Satélite WMAP Utilizando Dados do Radiotelescópio GEM/ Coelho,. C. M.. – São José dos Campos: INPE, 2008.

73p.; (INPE-13269-MAN/45)

1. Radiação Cósmica de Fundo. 2. Cosmologia. 3. Emissão Galáctica. 4. Emissão Sincrotron. 5. Métodos Numéricos.

A FOLHA DE APROVAÇÃO .

Carlos Alexandre Wuensche de Souza

Armando B. Bernui Leo

Joaquim Eduardo Rezende Costa

Marcio Antonio Geimba Maia

A meus pais ...

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, principalmente aos meus pais, pelo apoio e incentivo.

Aos meus orientadores, Armando Bernui e Carlos Alexandre, pela dedicação e amizade.

Aos participantes do grupo de Cosmologia, Ivan Soares, Larissa Carlos, Thyrso Villela e Fábio Carvalho, pelas discussões e sugestões.

Aos colegas Cláudio Soriano, Bárbara Heliadora, Eduardo dos Santos, Karleyne Medeiros, pela convivência e amizade.

Aos integrantes do corpo docente da divisão de Astrofísica do INPE em especial ao Oswaldo Duarte Miranda, Thyrso Villela, José Roberto Cecatto, José Carlos Neves de Araujo, Joaquim Eduardo Rezende Costa, Odylio Denys de Aguiar, Deonísio Cieslinski, Hugo Vicente Capelato, pelos cursos ministrados.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

A Deus.

RESUMO

A Radiação C3smica de Fundo em Microondas (RCFM) 3 a principal fonte de informa33o sobre o Universo primordial. O sat3lite WMAP, atualmente em opera33o, realiza medidas precisas em toda a esfera celeste das flutua33es de temperatura da RCFM em escalas que v3o de $23'$ a 180° . O uso desses dados para a cosmologia 3 limitado pela contamina33o causada pela emiss3o difusa da nossa Gal3xia. Idealmente, para o estudo cosmol3gico 3 preciso utilizar mapas da RCFM em que as emiss3es contaminantes tenham sido removidas. Para minimizar o efeito dessas emiss3es, 3 importante conhecer as componentes de emiss3o Gal3ctica e as suas correspondentes varia33es espaciais e espectrais. Este trabalho prop3e a produ33o de um mapa das flutua33es de temperatura da RCFM com contamina33o sincrotron minimizada utilizando os dados obtidos pelo radiotelesc3pio *Galactic Emission Mapping* (GEM). Para entender o comportamento das componentes de emiss3o Gal3ctica utilizamos o *Maximum Entropy Method* (MEM), que permite obter a distribui33o espacial das componentes de emiss3o Gal3ctica a partir de dados de cada componente conhecidos na literatura. Para a distribui33o espectral da componente de emiss3o sincrotron utilizamos os mapas baseados nos dados do GEM na frequ3ncia de 2300 MHz junto com outros mapas de emiss3o sincrotron provenientes de outros experimentos. Com isso, obtivemos espes valores para o 3ndice espectral: $-3,5 \leq \beta_s \leq -2,2$. Para limpar os mapas da RCFM produzido pelo sat3lite WMAP utilizamos o m3todo *Internal Linear Combination* (ILC), que consiste na combina33o linear dos mapas das cinco bandas de frequ3ncias com coeficientes que minimizam o sinal Gal3ctico. Os coeficientes de minimiza33o foram calculados baseados em uma estimativa do sinal da RCFM e nos mapas de cada componente de emiss3o Gal3ctica obtidos com o MEM. O mapa produzido difere em menos de 10% dos tr3s mapas dispon3veis na literatura, quando analisados fora do plano Gal3ctico. Na regi3o do plano, a diferen3a 3 de cerca de 10% em dois dos mapas e de 25% para o terceiro mapa. Essa diferen3a provavelmente 3 devida 3 utiliza33o do conjunto de dados produzidos pelo GEM. Nossos resultados sugerem que o mapa produzido neste trabalho tamb3m pode ser utilizado em estudos cosmol3gicos.

A FOREGROUND-REDUCED COSMIC MICROWAVE BACKGROUND RADIATION MAP DERIVED FROM WMAP SATELLITE AND GEM RADIOTELESCOPE DATA

ABSTRACT

Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation encodes fundamental information about the early universe. The WMAP satellite is carrying out very precise measurements on the celestial sphere of the CMB temperature fluctuations, in scales ranging from $23'$ to 180° . The use of such data for cosmology, however, is limited due to the foreground contaminations caused by the Galactic diffuse emissions. For cosmological studies we need CMB maps where contaminant radiations have been removed or at least minimized. To reduce the effect of these emissions, it is important to know the Galactic emission components and its corresponding spatial and spectral variations. In this work we produce foreground-reduced CMB temperature fluctuations map with the synchrotron contaminant radiation minimized by using data obtained from the GEM radiotelescope. To understand the behaviour of the Galactic emission components we use the Maximum Entropy Method (MEM), which provides the spatial distribution of Galactic emission components obtained from other publicly available data. For the spectral distribution component of synchrotron emission we use the maps based on data from GEM in the frequency of 2300 MHz, along with other synchrotron emission maps from other experiments. In this way, we got the following values for spectral index: $-3, 5 \leq \beta_s \leq -2, 2$. To obtain a foreground-reduced WMAP CMB map we use the Internal Linear Combination (ILC) method, which performs the linear combination of the the five frequency bands with coefficients that minimize the Galactic signal. The minimization of the coefficients were calculated based on an estimative of the CMB signal and on the maps of each Galactic emission component derived with the MEM. The map produced differs by less than 10% from the three maps available in the literature, when analyzed outside of the Galactic region. In the Galactic region the difference is around 10% in two of the three maps and 25% for the third map. This difference is probably due to the use of the data set produced by the GEM. Our results suggest that the map produced in this work can also be used for cosmological studies.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Modelo Cosmológico Padrão	19
1.2	Anisotropias da RCFM	20
1.3	Medidas da RCFM	23
1.4	Satélite WMAP	25
1.5	Contaminantes das Medidas da RCFM	26
2	EMIÇÃO GALÁCTICA EM RÁDIO E EM MICROONDAS	31
2.1	Emissão Sincrotron	31
2.1.1	Varição Espacial e Espectral da Emissão Sincrotron	32
2.1.2	Mapas de Emissão Sincrotron	32
2.2	Emissão Bremsstrahlung	34
2.2.1	Mapas de Emissão Bremsstrahlung	35
2.3	Emissão Térmica de Poeira	36
2.3.1	Mapas de Emissão Térmica de Poeira	37
3	MAPAS DO EXPERIMENTO GEM	39
3.1	O Experimento GEM	39
3.2	O Telescópio GEM	40
3.3	Os mapas GEM	41
3.4	O mapa em 2300 MHz	42
4	METODOLOGIA	43
4.1	Modelos das Componentes de Emissão Galáctica	43
4.1.1	Método de Máxima Entropia	43
4.1.2	Implementação Numérica do Algoritmo	44
4.1.3	Distribuições Espacial e Espectral	45
4.1.4	Mapas MEM	46
4.2	Método de Minimização da Contaminação das Medidas da RCFM	48
4.2.1	Método de Combinação Linear Interna	49

4.2.2	Mapa ILC	50
5	RESULTADOS	53
5.1	Mapas de Multifrequência	53
5.2	Anisotropias dos Mapas de Multifrequência para Multipolos de Baixa Ordem .	58
5.3	Função de Correlação Angular e Espectro de Potência	62
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Espectros de Potência. FONTE: Hu e Dodelson (2002)	22
1.2 Espectro de corpo negro da RCFM medido pelo FIRAS-COBE. FONTE: Mather et al. (1990)	23
1.3 Espectros de potência obtidos com os dados do WMAP (preto), ACBAR (violeta), Boomerang (verde) e CBI (vermelho). A linha contínua corresponde ao espectro de potência do modelo Λ CDM. FONTE: Gold et al. (2008).	25
1.4 Mapas do WMAP nas bandas K, Ka, Q, V, W. FONTE: Hinshaw et al. (2007).	27
1.5 Espectros das componentes da emissão Galáctica comparado com o espectro da RCFM. FONTE: Tello (1997)	28
2.1 a) Mapa de emissão sincrotron em 408MHz (Haslam et al. (1982)). b) Mapa sincrotron do WMAP em 23 GHz obtido pelo MEM. c) Mapa de índice espectral $\beta(408 \text{ MHz}, 23 \text{ GHz})$. FONTE: Bennett et al. (2003b)	33
2.2 Mapa H_α produzido por Finkbeiner (2003)	36
2.3 Mapa da emissão de poeira em 94 GHz. FONTE: Finkbeiner et al. (1999)	37
3.1 Fotografia do radiotelescópio do projeto GEM instalado no sítio de Cachoeira Paulista.	39
3.2 Ilustração do esquema de varredura. FONTE: Tello et al. (2007).	40
3.3 Mapa de intensidade total da emissão sincrotron em 2300 MHz. O mapa está em coordenadas Galácticas e a temperatura em Kelvin.	42
4.1 Mapa do índice espectral da emissão sincrotron, $\beta_s(p)(408 \text{ MHz}, 2300 \text{ MHz}, 23 \text{ GHz})$	45
4.2 Distribuição espacial das componentes de emissão sincrotron, bremsstrahlung e emissão térmica de poeira, obtidos pelo MEM.	47
4.3 Mapas de emissão Galáctica nas frequências do WMAP obtidos pela soma das componentes de emissão sincrotron, bremsstrahlung e emissão térmica de poeira.	48
4.4 Mapa das 12 regiões. FONTE: Hinshaw et al. (2007).	50
4.5 Contaminação Galáctica residual.	52
4.6 Mapa CILC com os dados do GEM.	52
5.1 Diferença entre o mapa CILC e o mapa WILC	53
5.2 Diferença entre o mapa CILC e o mapa SILC	54
5.3 Diferença entre o mapa CILC e o mapa TILC	54

5.4	Correlação entre os mapas CILC e WILC fora do plano Galáctico. A correlação é de 99%.	55
5.5	Correlação entre os mapas CILC e SILC fora do plano Galáctico. A correlação é de 98%.	55
5.6	Correlação entre os mapas CILC e TILC fora do plano Galáctico. A correlação é de 98%.	56
5.7	Correlação entre os mapas CILC e WILC dentro do plano Galáctico. A correlação é de 91%.	56
5.8	Correlação entre os mapas CILC e SILC dentro do plano Galáctico. A correlação é de 88%.	57
5.9	Correlação entre os mapas CILC e TILC dentro do plano Galáctico. A correlação é de 75%.	57
5.10	Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 2$	59
5.11	Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 3$	60
5.12	Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 4$	60
5.13	Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 5$	61
5.14	Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 6$	61
5.15	Função de correlação de dois pontos dos mapas CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul) e TCM (verde)	62
5.16	Função de correlação de dois pontos dos mapas CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul), e TCM (verde) para o hemisfério Norte.	63
5.17	Função de correlação de dois pontos dos mapas CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul), e TCM (verde) para o hemisfério Sul.	63
5.18	Espectro de potência do CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul) e TCM (verde)	64

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Experimentos	26
2.1 Mapas de Emissão Galáctica	32
2.2 Fator de Conversão	36
3.1 Mapas do Radiotelescópio GEM	41
3.2 Mapa em 2300 MHz	42
4.1 Coeficientes ω por Regiões	51
5.1 Coeficientes dos harmônicos esféricos do mapa CILC para baixos multipolos .	58
5.2 Potência do Quadrupolo e do Octopolo	58

1 INTRODUÇÃO

A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM) é a principal fonte de informação sobre o Universo primordial. A sua existência foi prevista por Gamow ([Gamow, 1948](#)), e por Alpher & Herman ([Alpher et al., 1948](#)). Foi observada pela primeira vez por Penzias & Wilson ([Penzias; Wilson, 1965](#)) e a interpretação cosmológica para a sua origem foi dada por Dicke e colaboradores ([Dicke et al., 1965](#)). A RCFM é altamente isotrópica com pequenos desvios da ordem de 10^{-5} ([Smoot et al., 1990](#)), e é corretamente descrita por um espectro de corpo negro com temperatura de $2,725 \pm 0,002$ K ([Mather et al., 1999](#); [Bennett et al., 2003b](#)).

Um dos resultados mais importantes para a Cosmologia Moderna foi a descoberta das pequenas flutuações de temperatura na RCFM. As medidas destas flutuações são a chave para conhecer as propriedades importantes do Universo tais como sua geometria, seu conteúdo e sua evolução, ajudando a impor limites nos parâmetros cosmológicos do Modelo Cosmológico Padrão, tais como densidade de matéria bariônica, matéria escura, energia escura e o valor da constante de Hubble (veja, e.g., [Spergel et al. \(2003\)](#), [Spergel et al. \(2007\)](#), [Hinshaw et al. \(2008\)](#)).

Muitos experimentos foram e estão sendo construídos para medir a RCFM com precisão e resolução angular cada vez melhor (veja, e.g., [Bersanelli et al. \(2002\)](#)). Em geral, os dados obtidos com esses instrumentos são limitados pela contaminação causada pela emissão difusa da nossa Galáxia. Este sinal Galáctico não pode ser separado por técnicas observacionais e nem por melhoria dos instrumentos. Para obter um mapa da RCFM com contaminação Galáctica minimizada para o estudo aprimorado do Modelo Cosmológico Padrão, é preciso conhecer as componentes de emissão Galáctica assim como as variações espaciais e espectrais de cada componente (veja, e.g., [Bennett et al. \(2003b\)](#), [Tegmark et al. \(2003\)](#), [Eriksen et al. \(2004\)](#), [Hinshaw et al. \(2007\)](#), [Park et al. \(2007\)](#), [Gold et al. \(2008\)](#)).

Neste Capítulo faremos uma breve introdução ao Modelo Cosmológico Padrão, o qual descreve satisfatoriamente bem as flutuações de temperatura observadas na RCFM. Discutimos também os principais experimentos desenvolvidos para medir estas flutuações. Também faremos uma breve introdução aos principais contaminantes da RCFM.

1.1 Modelo Cosmológico Padrão

Segundo o Modelo Cosmológico Padrão, o Universo passou por um estado primordial em que a temperatura e a densidade eram extremamente elevadas ($T \sim 10^{15}$ K, $\rho \sim 10^{25}$ g/cm³ em $t \sim 10^{-8}$ s). O Universo era preenchido por um fluido primordial constituído

de radiação e partículas elementares extremamente energéticas. Nesta época a dinâmica do Universo era dominada pela radiação. Por causa da alta temperatura do fluido, havia formação e aniquilação das partículas elementares. Quando a temperatura do Universo atingiu $\sim 10^9$ K a produção e aniquilação de pares e as reações nucleares cessaram, deixando como resultado núcleos atômicos (a maioria de prótons livres e núcleos de hélio), fótons e elétrons livres. A matéria estava acoplada à radiação por causa do espalhamento Thomson entre fótons e elétrons livres. Por causa desta interação, o fluido de matéria e radiação deveria se encontrar em equilíbrio térmico. Neste cenário, [Gamow \(1948\)](#) previu que o Universo deveria estar permeado por uma radiação com espectro de corpo negro dado pela lei de Planck

$$B_\nu(T) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (1.1)$$

em que B_ν é o brilho por unidade de frequência ν , h é a constante de Planck, k é a constante de Boltzman, e c é a velocidade da luz.

A medida que o Universo se expandiu, a energia e a densidade de elétrons livres tornou-se baixa e a taxa de espalhamento Thomson entre fótons e elétrons livres foi reduzida progressivamente marcando o início da era de domínio da matéria. Nesse instante ocorreu a recombinação dos prótons e elétrons, e os primeiros átomos de hidrogênio foram formados ($T = 3000$ K). Nesta fase a radiação se desacoplou da matéria.

A RCFM são os fótons liberados no desacoplamento entre matéria e radiação. A região no espaço tempo a partir do qual os fótons se desacoplaram da matéria é a chamada Superfície do Último Espalhamento (doravante, SUE) que ocorreu no *redshift* $z \simeq 1100$. Devido ao fato do desacoplamento não ter ocorrido de forma instantânea, a SUE apresenta uma espessura de $\Delta z \simeq 80$ (veja, e.g., [Lachièze-Rey e Gunzig \(1999\)](#))

Com a expansão do Universo, a temperatura dos fótons da RCFM diminuiu até atingir a temperatura atual de $T_0 = 2,725$ K sem afetar significativamente suas características, tais como espectro, distribuição angular e polarização. Na próxima seção apresentamos mais detalhes sobre a distribuição angular da RCFM.

1.2 Anisotropias da RCFM

A RCFM possui flutuações de temperatura, ou anisotropias, que estão relacionadas com as flutuações de densidade de matéria no Universo primordial que deram origem às grandes estruturas observadas hoje (aglomerados, superaglomerados, filamentos e vazios). As anisotropias observadas na esfera celeste geralmente são expressas através da expansão

em harmônicos esféricos

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi), \quad (1.2)$$

em que θ e ϕ são as coordenadas angulares, a_{lm} são os coeficientes da expansão, $Y_{lm}(\theta, \phi)$ são os harmônicos esféricos, l e m são números inteiros tais que $l \geq 0$ e $|m| \leq l$.

Os harmônicos esféricos, $Y_{lm}(\theta, \phi)$, estão relacionados com os polinômios de Legendre, P_l^m , de grau l e ordem m por

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = \left(\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \right)^{1/2} P_l^m(\cos \theta) \exp(im\phi), \quad (1.3)$$

e os coeficientes da expansão são dados por

$$a_{lm} = \int Y_{lm}^*(\theta, \phi) \frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) d\Omega, \quad (1.4)$$

em que $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ é o elemento de ângulo sólido. Os a_{lm} correspondem às amplitudes das flutuações de temperatura. Toda a informação da distribuição angular observada deve estar contida nos a_{lm} . Na expansão o termo $l = 0$, conhecido como monopolo da RCFM, corresponde à temperatura média da RCFM, $T_0 = 2,725 \pm 0,002$ K (Mather et al., 1999; Bennett et al., 2003b). Isso sugere que a RCFM deve ter sido gerada em um processo de equilíbrio térmico entre matéria e radiação. O dipolo, $l = 1$, é a maior anisotropia com amplitude de 10^{-3} K (Smoot et al., 1977). A maior parte da contribuição de dipolo não tem origem cosmológica, sendo interpretado como o efeito Doppler resultante do nosso movimento em relação à RCFM. Depois de subtrair dos mapas em análise estes dois termos é que obtemos o sinal correspondente às anisotropias da RCFM. Os multipolos de ordem superior, $l \geq 2$, são interpretados como o resultado de perturbações de densidade de matéria no Universo primordial referente à época da SUE. Cada momento de multipolo l corresponde a uma escala angular dada por $\theta \simeq 180^\circ/l$.

A função de correlação angular de dois pontos separados por um ângulo α é uma forma alternativa de quantificar a potência das flutuações de temperatura em uma determinada escala angular, dada por

$$C(\alpha) = \left\langle \frac{\Delta T}{T}(\mathbf{m}) \frac{\Delta T}{T}(\mathbf{n}) \right\rangle = \frac{1}{4\pi} \sum_l (2l+1) C_l P_l(\cos \alpha), \quad (1.5)$$

sendo $\mathbf{m}$ e $\mathbf{n}$ são vetores unitários orientados nas coordenadas θ e ϕ , e os C_l são os momentos de multipolos dados por

$$C_l \equiv (2l+1)^{-1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2. \quad (1.6)$$

A representação dos momentos de multipolos em função da escala l é chamada espectro de potência da RCFM. A determinação da posição e da amplitude dos picos do espectro de potência da RCFM permite estimar os parâmetros cosmológicos, tais como densidade de matéria bariônica, matéria escura, energia escura e indiretamente o valor da constante de Hubble (ver Figura 1.1). Para obter um espectro de potência devido somente às flutuações de temperatura da RCFM é preciso remover totalmente a contaminação devido à emissão Galáctica.

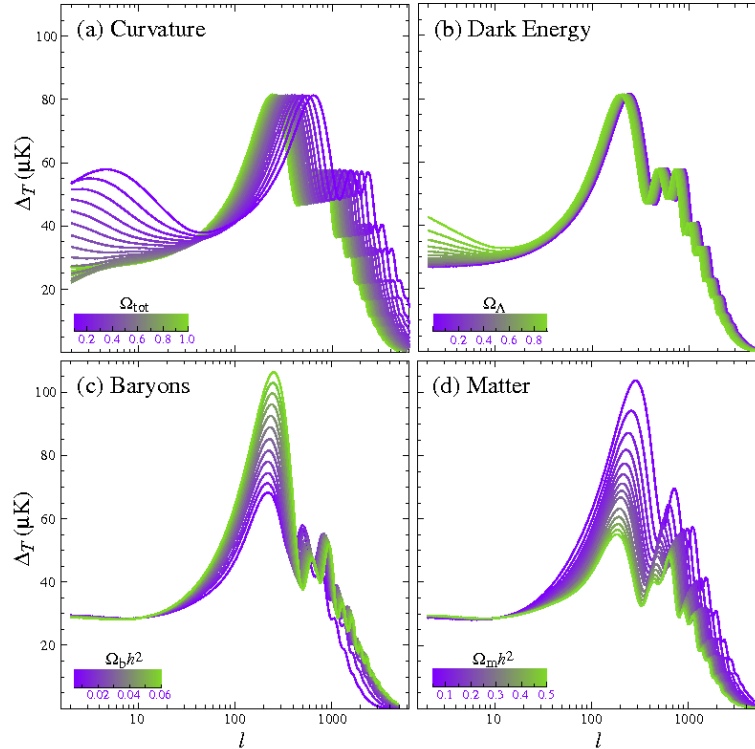


Figura 1.1 - Espectros de Potência. FONTE: [Hu e Dodelson \(2002\)](#)

1.3 Medidas da RCFM

Depois da descoberta da RCFM em 1965, vários instrumentos foram construídos com o objetivo de analisar as características de seu espectro, distribuição angular e polarização. Em geral, os experimentos mediram as flutuações de temperatura nas escalas angulares $\theta \approx 10^\circ - 5'$ que corresponde aos multipolos $l \approx 18 - 2000$.

O *Cosmic Background Explorer* (COBE) foi o primeiro satélite dedicado a observar a RCFM em grandes escalas angulares ($\sim 7^\circ$). Havia três instrumentos a bordo do COBE: o DIRBE (Diffuse InfraRedBackground Experiment), desenvolvido para mapear a Radiação Cósmica de Fundo no infravermelho (Hauser et al., 1998); o FIRAS (*Far InfraRed Absolute Spectrophotometer*), que confirmou que a RCFM possui um espectro de corpo negro quase perfeito com temperatura de $2,726 \pm 0,002$ K (ver Figura 1.2) (Mather et al., 1990); e o DMR (*Differential Microwave Radiometer*), que mediu pela primeira vez as flutuações de temperatura da RCFM da ordem de 10^{-5} com respeito à temperatura de corpo negro (Smoot et al., 1990). Para ter maior controle dos efeitos sistemáticos e quantificar a contaminação devido à Galáxia, o COBE usou três bandas de frequência, em 31, 53 e 90 GHz.

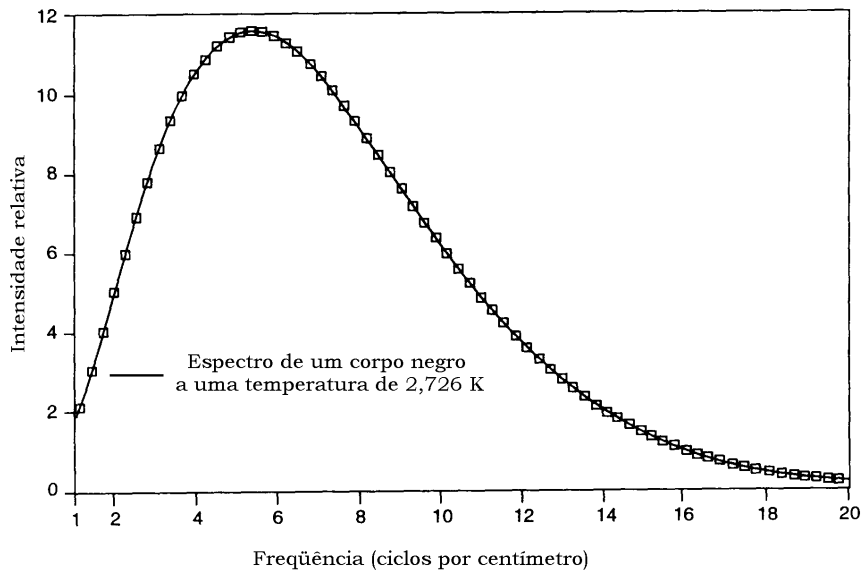


Figura 1.2 - Espectro de corpo negro da RCFM medido pelo FIRAS-COBE. FONTE: Mather et al. (1990)

Depois do COBE, vários instrumentos foram construídos com melhor precisão e resolução angular para medir as flutuações de temperatura da RCFM (para mais detalhes ver, e.g., Bersanelli et al. (2002)). Entre eles destacamos:

- CAT (Cosmic Anisotropy Telescope), 1994-1997: foi o primeiro interferômetro que mediu as flutuações de temperatura da RCFM. O CAT foi projetado para detectar anisotropias primordiais na faixa de $10' - 60'$. O sucessor do CAT foi o VSA (Very Small Array);
- BOOMERanG (Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics), 1997-2003: foi um instrumento a bordo de balão que mapeou a RCFM em dois vôos distintos, o primeiro vôo em 1998, e o segundo em 2003. O primeiro vôo mediu as anisotropias da RCFM, e o segundo vôo mediu tanto temperatura quanto polarização da RCFM. Fez medidas em escalas angulares correspondentes aos multipolos $75 < l < 1025$;
- CBI (Cosmic Background Imager), 1999-presente: mede as flutuações em pequenas escalas angulares com boa resolução em pequenas regiões do céu e mede polarização da RCFM. As observações do interferômetro CBI são sensíveis as escalas angulares de $\sim 60' - 5'$ que corresponde a $300 < l < 3000$.
- ACBAR (Arcminute Cosmology Bolometer Array Receptor), 2001-presente: tem produzido medidas das flutuações de temperaturas mais precisas que os experimentos anteriores em pequenas escalas angulares.
- WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), 2001-presente: mede as flutuações de temperatura e a polarização da RCFM no céu inteiro utilizando observações em cinco frequências (ver Figura 1.4). Embora o WMAP possua boa resolução angular para medir flutuações de temperatura em grandes escalas angulares, não possui boa resolução para medir as flutuações em pequenas escalas angulares como os interferômetros. A seguir, apresentamos mais detalhes sobre o satélite WMAP.

Na Figura 1.3 é ilustrado o espectro de potência da RCFM. Nesta figura se observa o espectro de potência do modelo Λ CDM, que corresponde ao cenário cosmológico de matéria escura fria com constante cosmológica (linha contínua), os espectros de potência obtidos com os dados do WMAP (Dunkley et al., 2008), ACBAR (Reichardt et al., 2008), Boomerang (Jones et al., 2006), CBI (Readhead et al., 2004). Desses três experimentos, o único que mede a RCFM no céu inteiro é o WMAP (ver Tabela 1.1).

Dentre os próximos instrumentos que visa estudar a RCFM, está o satélite Planck, planejado para ser lançado no final de 2008. Este instrumento terá maior sensibilidade e maior precisão nas medidas de flutuações de temperatura e polarização da RCFM. As observações serão feitas em dez frequências entre 30 – 850 GHz, com resolução angular de $33' - 5'$, e sensibilidade de $\Delta T/T \simeq 10^{-6}$.

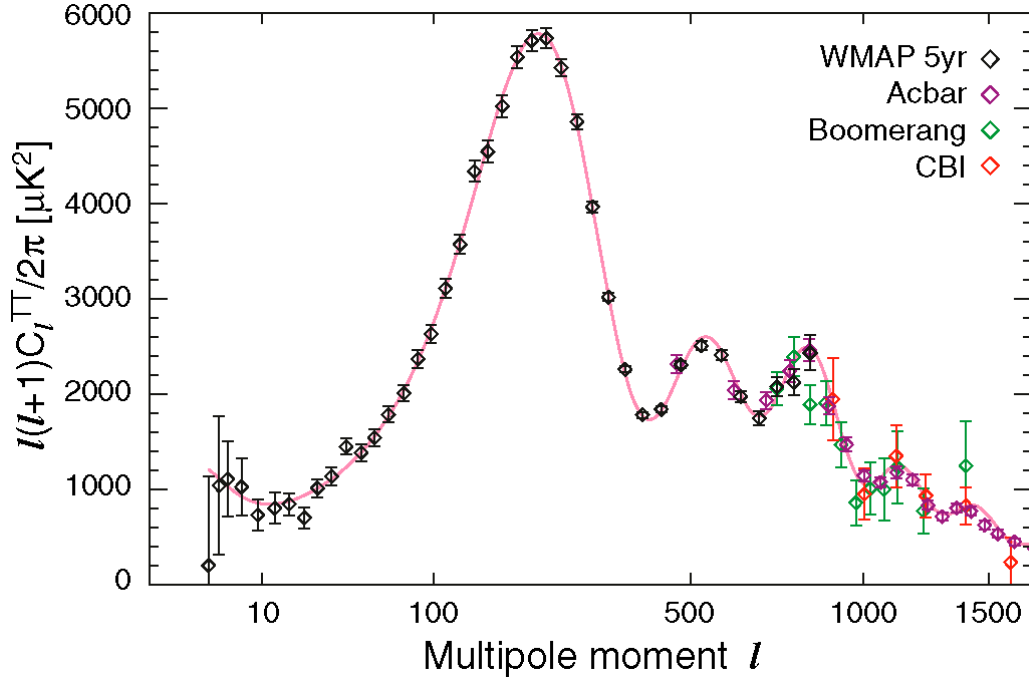


Figura 1.3 - Espectros de potência obtidos com os dados do WMAP (preto), ACBAR (violeta), Boomerang (verde) e CBI (vermelho). A linha contínua corresponde ao espectro de potência do modelo Λ CDM. FONTE: [Gold et al. \(2008\)](#).

1.4 Satélite WMAP

O satélite WMAP foi lançado com a intenção de medir as flutuações de temperatura e a polarização da RCFM com resolução melhor que o COBE. O WMAP é 45 vezes mais sensível, e tem uma resolução angular 33 vezes melhor do que o seu antecessor.

O WMAP usa radiômetros diferenciais de microondas sensíveis à polarização que medem as diferenças de intensidade da RCFM em diferentes direções do céu, sendo um radiômetro na banda K (23 GHz), um na banda Ka (33 GHz), dois na banda Q (41 GHz), dois na banda V (61 GHz), e quatro na banda W (94 GHz), com resolução angular de 0,88°; 0,66°; 0,51°; 0,35° e 0,22°; respectivamente ([Bennett et al., 2003a](#)).

Os dados do primeiro ano do WMAP foram publicados somente com medidas de flutuações de temperatura da RCFM. Os dados de três e cinco anos incluem as medidas de flutuações de temperatura e polarização da RCFM. Os dados do primeiro ano são compatíveis com o modelo Λ CDM e o modelo inflacionário ([Spergel et al., 2003](#)), confirmado pelos dados do terceiro e do quinto ano, inclusive com maior precisão na determinação dos parâmetros cosmológicos ([Spergel et al., 2007](#); [Hinshaw et al., 2008](#)). Para obter estes resultados, primeiro é necessário obter um mapa onde a contaminação Galáctica seja mínima. Para quantificar e subtrair a contribuição causada pelo sinal Galáctico se utilizam mapas de emissão

Tabela 1.1 - Experimentos

nome	Tipo ⁽¹⁾ /Técnica ⁽²⁾	resolução (HPBW)	cobertura do céu	freqüência (GHz)
DMR-COBE	E/R	7°	100%	31,5 53 90
CAT	S/R-I	30'	0,02%	13 17
Boomerang	B/B	10'	1,8%	90 150 240 410
CBI	S/R-I	5'	0,1%	26 36
ACBAR	S/B	5'	0,1%	150 220 280 350
WMAP	E/R	13'	100%	23 33 41 61 94

⁽¹⁾ E= espaço, S= solo, B= balão; ⁽²⁾ R= radiômetro, B= bolômetro, I= interferômetro

Galáctica conhecidos na literatura.

1.5 Contaminantes das Medidas da RCFM

A emissão Galáctica difusa em microondas é um dos principais contaminantes do sinal da RCFM. Os três principais processos físicos de emissão difusa em microondas da Galáxia são:

- A emissão sincrotron, gerada pela perda de energia de elétrons com velocidades relativísticas espiralando ao redor das linhas de campo magnético interestelar. A intensidade desta radiação depende da distribuição da energia dos elétrons e do campo magnético da Galáxia. O espectro da radiação sincrotron, em termos da temperatura de brilho, é bem descrito por uma lei de potência $T(\nu) \propto \nu^{-\beta_s}$, em que ν é a freqüência da radiação e $-3,4 \leq \beta_s \leq -2,2$ (Bennett et al., 2003b) é o índice espectral. O índice espectral da emissão sincrotron tem uma variação espacial por causa das variações espaciais da densidade dos elétrons e do campo magnético da Galáxia. Estimativas precisas de β são essenciais para quantificar a contribuição da componente sincrotron para a emissão difusa da Galáxia.

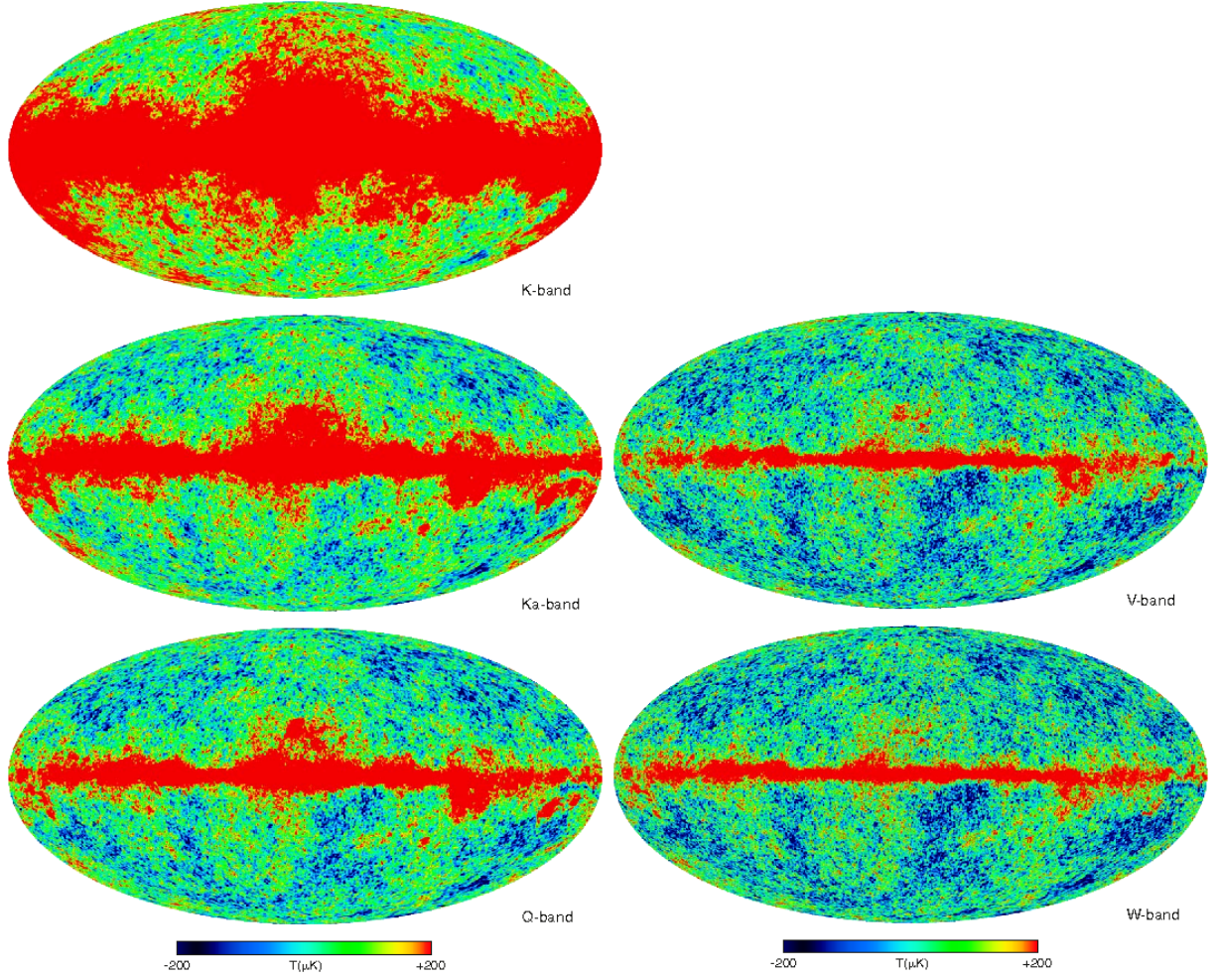


Figura 1.4 - Mapas do WMAP nas bandas K, Ka, Q, V, W. FONTE: [Hinshaw et al. \(2007\)](#).

- A radiação bremsstrahlung, causada pela interação dos elétrons livres com o campo Coulombiano de um íon. A emissão bremsstrahlung está principalmente associada às regiões HII. Estas são regiões de intensa formação estelar, localizadas principalmente ao longo do plano Galáctico. A temperatura de brilho da região HII é dada por $T_b = T_e(1 - e^{-\tau})$, em que τ é a profundidade óptica e T_e é a temperatura do eletrôn. No meio opticamente fino e para frequências em microondas $T_b \propto \nu^{-\beta_{ff}}$, em que $\beta_{ff} = 2,14$ (veja, e.g., [Bersanelli et al. \(2002\)](#)).

- A emissão térmica de poeira é aquela emitida pelos grãos de poeira interestelar aquecidos pela radiação. Grãos de poeira são pequenas partículas sólidas, com raios entre 1 e 100 nm, dependendo da sua composição química que é principalmente de silicato e carbonato. A poeira absorve a radiação no ultravioleta e no óptico e reemite no infravermelho. O espectro da radiação térmica de poeira segue uma lei de potência $I_p(\nu) = \nu^\alpha B_\nu(T_p)$, em que o índice $\alpha = 2$ (veja, e.g., [Draine e Lazarian \(1998\)](#), [Schlegel et al. \(1998\)](#)), T_p é a

temperatura do grão de poeira e $B_\nu(T_p)$ é a função de Planck.

Uma descrição mais detalhada desses processos de emissão será feita no Capítulo 2.

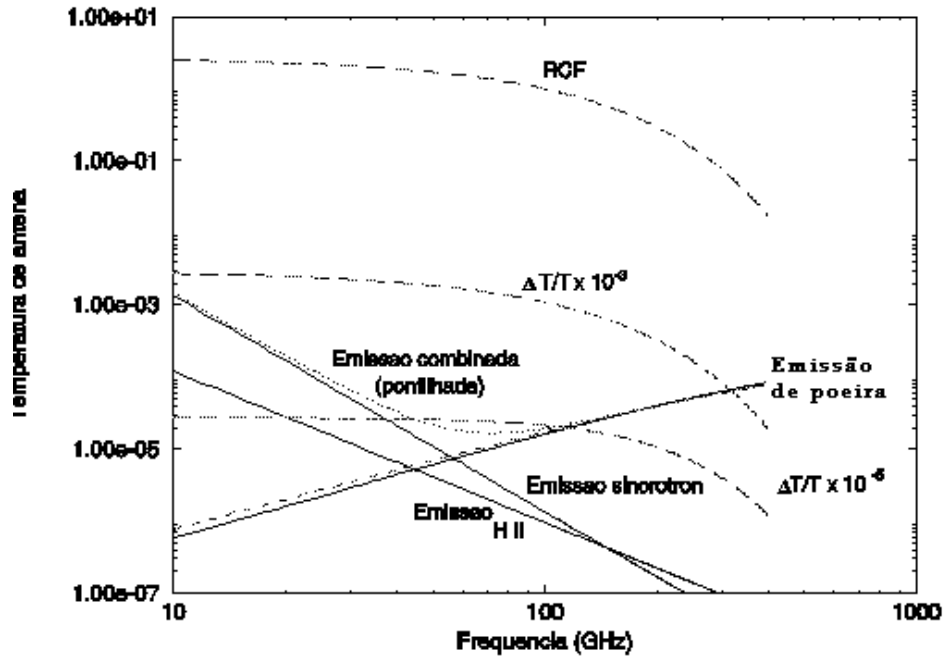


Figura 1.5 - Espectros das componentes da emissão Galáctica comparado com o espectro da RCFM. FONTE: [Tello \(1997\)](#)

A Figura 1.5 resume o comportamento espectral das componentes da emissão Galáctica comparado com o monopolo, dipolo e quadrupolo da RCFM. Como observado na figura, as componentes sincrotron e bremsstrahlung são mais intensas nas frequências abaixo de 60 GHz, a emissão térmica de poeira é mais intensa principalmente nas frequências acima de 60 GHz, e o quadrupolo da RCFM é relativamente mais intenso nas frequências entre 50 e 80 GHz.

Este trabalho possui três etapas. A primeira etapa é entender o comportamento das componentes de emissão Galáctica, em particular da componente de emissão sincrotron. A segunda etapa é obter um mapa multifrequência combinando os mapas de três anos do WMAP onde a contaminação proveniente da emissão Galáctica seja mínima. Em seguida, será feita uma análise do mapa obtido e também uma comparação com outros mapas da RCFM com contaminação Galáctica minimizada existentes na literatura ([Hinshaw et al., 2007](#); [Park et al., 2007](#); [de Oliveira-Costa; Tegmark, 2006](#)).

Para limpar os mapas da RCFM produzido pelo satélite WMAP utilizamos o método chamado *Internal Linear Combination* (ILC). O método consiste em combinar os mapas das cinco bandas de frequências do WMAP com coeficientes que minimizam o sinal Galáctico (Bennett et al., 2003b; Hinshaw et al., 2007). Para calcular os coeficientes do método ILC é preciso ter um conhecimento prévio do comportamento das componentes de emissão Galáctica em função do seu padrão espacial e espectral. Para entender o comportamento das componentes de emissão Galáctica utilizamos o *Maximum Entropy Method* (MEM). Com o MEM é possível obter a distribuição espacial das componentes de emissão Galáctica nas frequências do WMAP a partir de dados de cada componente conhecidos na literatura. Para a distribuição espectral da componente de emissão sincrotron utilizaremos os mapas baseados nos dados do *Galactic Emission Mapping* (GEM) na frequência de 2300 MHz (Tello et al., 2007) junto com outros mapas de emissão sincrotron proveniente de outros experimentos, visando utilizar dados na maior parte da esfera celeste.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 revisamos os três processos de emissão Galáctica e descrevemos os mapas conhecidos na literatura. No Capítulo 3 apresentamos as características do radiotelescópio GEM e dos mapas obtidos com este experimento. No Capítulo 4 descrevemos o método utilizado para construir os modelos de emissão Galáctica, o método escolhido para descontaminação das medidas da RCFM. Os resultados e as conclusões são descritos nos Capítulos 5 e 6, respectivamente.

2 EMISSÃO GALÁCTICA EM RÁDIO E EM MICROONDAS

A emissão Galáctica difusa e no contínuo em microondas é um dos principais contaminantes do sinal da RCFM. As três fontes principais de emissão da nossa Galáxia são: emissão sincrotron, emissão bremsstrahlung e emissão térmica de poeira. Neste Capítulo descrevemos brevemente as características destas componentes de emissão Galáctica.

2.1 Emissão Sincrotron

A emissão sincrotron é gerada pela aceleração dos elétrons com velocidades relativísticas espiralando ao redor das linhas de campo magnético da Galáxia, tipicamente da ordem de $1 - 5\mu G$. A intensidade desta radiação depende da distribuição da energia dos elétrons, $N(E)$ e do campo magnético da Galáxia, B , tal que

$$I(\nu) \sim \int \int P(\nu, B, E) N(E, s) dE ds, \quad (2.1)$$

em que $P(\nu, B, E) \propto B^{(p+1)/2} \nu^{-(p-1)/2}$ é a potência irradiada por um elétron ao longo do percurso s até o observador e $N(E)dE \propto E^{-p}dE$ é a distribuição de elétrons como função da energia, então

$$I(\nu) \propto B^{(p+1)/2} \nu^{-(p-1)/2}. \quad (2.2)$$

A temperatura de brilho da radiação sincrotron também é uma lei de potência dada por

$$T_b(\nu) \propto \nu^\beta, \quad (2.3)$$

em que β é o índice espectral. A temperatura de brilho está relacionada com a intensidade através da lei de Rayleigh-Jeans dada por

$$T_b(\nu) = (c^2/2k\nu^2)I(\nu) \equiv 3,25 \times 10^{-5} I(\nu)/\nu^2, \quad (2.4)$$

em que $T_b(\nu)$ está em K, $I(\nu)$ em Jy sr⁻¹ e ν em GHz. Das Equações 2.2, 2.3 e 2.4 temos que $\beta = -(p+3)/2$.

Tabela 2.1 - Mapas de Emissão Galáctica

referência	freqüência (MHz)	resolução (HPBW)	cobertura do céu
Haslam et al. (1970)	408	$0,75^{\circ(1)}$	$-20^{\circ} < \delta < +60^{\circ}$
Haslam et al. (1974)	408	$0,62^{\circ(2)}$	$-08^{\circ} < \delta < +48^{\circ}$
Haslam et al. (1975)	408	$0,85^{\circ(3)}$	$-90^{\circ} < \delta < -05^{\circ}$
Haslam et al. (1981)	408	$0,82^{\circ(4)}$	$+45^{\circ} < \delta < +90^{\circ}$
Reich (1982)	1420	$0,58^{\circ(5)}$	$-19^{\circ} < \delta < +24^{\circ}$
Reich e Reich (1986)	1420	$0,58^{\circ(5)}$	$20^{\circ} < \delta < +90^{\circ}$
Reich et al. (2001b)	1420	$0,59^{\circ(6)}$	$-90^{\circ} < \delta < -10^{\circ}$

⁽¹⁾ Jodrell Bank, Mark I; ⁽²⁾ Effelsberg; ⁽³⁾ Parkes;;
⁽⁴⁾ Jodrell Bank, Mark I A; ⁽⁵⁾ Stockert; ⁽⁶⁾ Villa Elisa.

2.1.1 Variação Espacial e Espectral da Emissão Sincrotron

Como foi mostrado na seção anterior, o índice espectral esta diretamente relacionado com o espectro de energia do elétron e deste modo varia espacialmente, tendo em vista as variações espaciais da densidade dos elétrons e do campo magnético da Galáxia. Estimativas de β são essenciais para quantificar a contribuição da componente sincrotron para a emissão difusa da Galáxia.

Sabe-se que elétrons relativísticos perdem energia por diferentes mecanismos. Para $E \leq 10$ GeV que equivale a 10 GHz, os elétrons escapam da Galáxia, e para $E \geq 10$ GeV o mecanismo que prevalece é a radiação sincrotron. Além disso, próximo ao plano Galáctico os elétrons perdem mais energia e em altas latitudes os elétrons escapam facilmente. A inclinação da curva do espectro sincrotron muda com a combinação desses efeitos. O espectro plano (e.g., $\beta < -2,7$) indica que os elétrons podem escapar da Galáxia antes de perder frações significativas da sua energia. O espectro inclinado (e.g., $\beta < -2,9$) indica alta taxa de perda de energia e baixa taxa de escape (veja, e.g., [Bennett et al. \(2003b\)](#)).

2.1.2 Mapas de Emissão Sincrotron

Pesquisas em baixas frequências ($\nu \leq 10$ GHz) são usadas para estimar o índice espectral da emissão sincrotron. Os principais mapas de emissão sincrotron disponíveis na literatura são os mapas em 408 MHz ([Haslam et al., 1982](#)) e 1400 MHz ([Reich et al., 2001a](#)). O mapa em 408 MHz e 1400 MHz são mapas do céu inteiro, montados a partir de vários conjuntos de dados obtidos usando diferentes radiotelescópios com resolução angular semelhante (veja mais detalhes na Tabela 2.1). Estes mapas são limitados por erros sistemáticos, como por exemplo, a presença de *stripes* gerados pelas correspondentes estratégias observacionais.

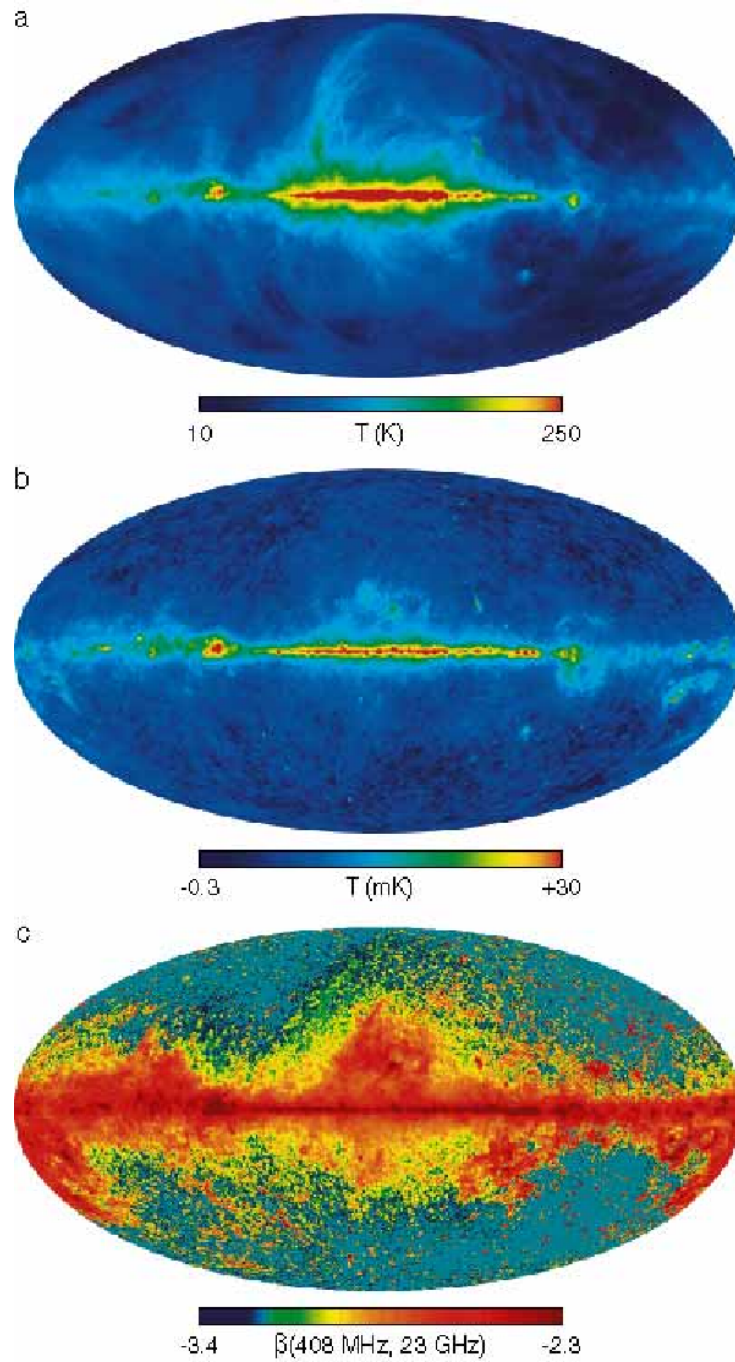


Figura 2.1 - a) Mapa de emissão sincrotron em 408MHz (Haslam et al. (1982)). b) Mapa sincrotron do WMAP em 23 GHz obtido pelo MEM. c) Mapa de índice espectral $\beta(408 \text{ MHz}, 23 \text{ GHz})$. FONTE: Bennett et al. (2003b)

A equipe do WMAP usa o MEM para estudar as componentes de emissão Galáctica. Com esse método, eles obtiveram mapas de cada componente de emissão em cinco bandas de frequências (23, 33, 41, 61, e 94 GHz). Com isso, determinou-se o valor do índice espectral para a emissão sincrotron combinando os mapas [Haslam et al. \(1982\)](#) e o mapa sincrotron em 23 GHz obtido pelo MEM que pode ser visto na Figura 2.1. Os dados de 408 MHz foram processados pela equipe do WMAP para retirar os *stripes* e outros efeitos sistemáticos desse mapa. O índice espectral foi calculado usando a seguinte expressão

$$\beta_s = \frac{\log T_1/T_2}{\log \nu_1/\log \nu_2}, \quad (2.5)$$

em que $\nu_1 = 23$ GHz, $\nu_2 = 408$ MHz e $-3,4 \leq \beta_s \leq -2,2$. Esta fórmula assume que β_s não vária entre as duas frequências considerada. O desconhecimento da variação do índice espectral da emissão sincrotron é um dos principais problemas para se determinar a contribuição dessa emissão nas medidas da RCFM.

2.2 Emissão Bremsstrahlung

A radiação bremsstrahlung é produzida pelo gás ionizado quente de baixa densidade da Galáxia. Para uma distribuição térmica de elétrons à temperatura $T_e < 550.000$ K, a emissividade volumétrica da emissão bremsstrahlung em unidades de $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-3}$, é dada por

$$\epsilon_\nu = 6,8210^{-38} Z^2 n_e n_i T_e^{-1/2} e^{-h\nu/kT} g_{ff}, \quad (2.6)$$

em que g_{ff} é o fator de Gaunt, e n_i e n_e são as densidades de ions e elétrons, respectivamente (para mais detalhes ver [Rybicki e Lightman \(1979\)](#)).

A temperatura de brilho é dada por

$$T_b = T_e(1 - e^{-\tau}), \quad (2.7)$$

em que τ é a profundidade óptica da emissão. Para as frequências relevantes para observação da RCFM (10 e 100 GHz), $T_b \ll T_e$, i.e. $\tau \ll 1$, então $T_b \approx T_e \tau$.

A profundidade óptica da emissão bremsstrahlung é dada por ([Oster, 1961](#))

$$\tau = 3,014 \times 10^{-2} T_e^{-1,5} \nu^{-2} \times \{\ln[4,955 \times 10^{-2} \nu - 1]\} \times (EM)_{cm^{-6}pc}, \quad (2.8)$$

em que EM é a medida da emissão que depende da densidade de íons e da densidade de elétrons. Uma aproximação para profundidade óptica é dada por (ver, e.g., [Dickinson et al. \(2003\)](#))

$$\tau' = 8,235 \times 10^{-2} T_e^{-1,35} \nu^{-2,1} \times (EM)_{cm^{-6}pc}. \quad (2.9)$$

Para baixas frequências (≤ 1 GHz), o erro relativo desta equação é pequeno, mas para as frequências acima de 10 GHz o erro aumenta para 20%. Então, [Mezger e Henderson \(1967\)](#) definiram o fator $a(T, \nu)$, dado pela razão entre as duas equações

$$a = \frac{\tau}{\tau'}. \quad (2.10)$$

Nestas condições a temperatura de brilho é dada por

$$T_b = 8,235 \times 10^{-2} a T_e^{-0,35} \nu^{-2,1} (1 + 8,08) \times (EM)_{cm^{-6}pc}, \quad (2.11)$$

em que o fator $(1 + 8,08)$ é a contribuição devido aos átomos de He, assumindo que todos estão ionizados.

2.2.1 Mapas de Emissão Bremsstrahlung

A emissão bremsstrahlung está principalmente associada às regiões HII. Além da emissão bremsstrahlung as regiões HII também produzem emissão da linha H_α do Hidrogênio. [Finkbeiner \(2003\)](#) produziu um mapa H_α do céu inteiro (ver Figura 2.2) com resolução de 6' (FWHM). Este mapa é uma combinação dos mapas VTSS (*Virginia Tech Spectral line Survey*), WHAM (*Winsconsin H-Alpha Mapper*) e SHASSA (*Southern H-Alpha Sky Survey*).

A intensidade da emissão H_α é dada por

$$I(R) \propto T_4^{-1.0717} 10^{-0.029/T_4} \times (EM)_{cm^{-6}pc}, \quad (2.12)$$

em que T_4 é a temperatura dos elétrons em unidades de 10^4 K e R é a unidade de medida

Tabela 2.2 - Fator de Conversão

Bandas	K	Ka	Q	V	W
frequência (GHz)	23	33	41	61	94
$\Delta T/\Delta T_A$	1,014	1,029	1,044	1,100	1,251
$T_A/I(R)$ ($\mu K R^{-1}$)	11,4	5,23	3,28	1,40	0,56

Rayleighs ($R \equiv 2,42 \times 10^{-7} \text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ no comprimento de onda de $0,6563 \mu\text{m}$).

Um mapa H_α pode ser convertido em um mapa de emissão bremsstrahlung usando as Equações 2.11 e 2.12

$$\frac{T_b}{I(R)} \propto \nu_{GHz}^{-2.14} T_4^{0.667} 10^{-0.029/T_4} (1 + 0.08). \quad (2.13)$$

O fator de conversão é mostrado na Tabela 2.2, para as frequências do WMAP, usando $T_e = 8000K$.

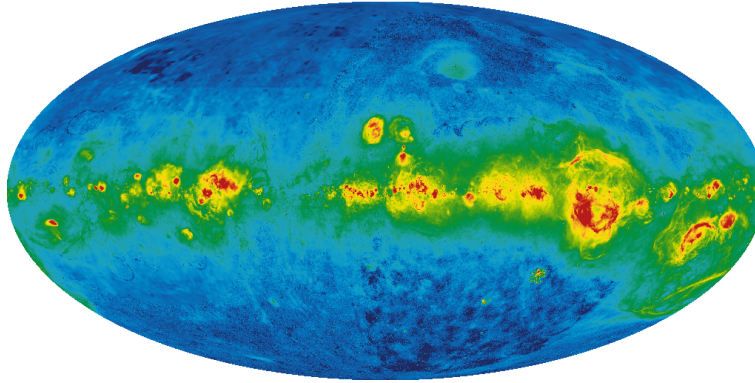


Figura 2.2 - Mapa H_α produzido por Finkbeiner (2003)

2.3 Emissão Térmica de Poeira

A intensidade da emissão térmica de poeira é dada por

$$I_p(\nu) = \int ds \rho \kappa_\nu B_\nu(T_b), \quad (2.14)$$

em que T_b é a temperatura do grão de poeira, ρ é a densidade de massa, κ_ν é a opacidade e $B_\nu(T_b)$ é a função de Planck. Em geral, a opacidade é dada por uma lei de potência do tipo

$$\kappa_\nu = \nu^\alpha, \quad (2.15)$$

em que $\alpha = 2$ (veja, e.g., [Draine e Lazarian \(1998\)](#), [Schlegel et al. \(1998\)](#)).

Um mapa em intensidade de radiação pode ser convertido em temperatura de antena usando a lei de Rayleigh-Jeans

$$T_A(\nu) \equiv 4026 I_p(\nu) / \nu^2, \quad (2.16)$$

em que $T_A(\nu)$ está em μK , $I_p(\nu)$ em MJy sr^{-1} e ν em GHz.

2.3.1 Mapas de Emissão Térmica de Poeira

A emissão térmica de poeira foi mapeada em todo o céu em várias bandas do infravermelho pelas missões IRAS e COBE. [Schlegel et al. \(1998\)](#) combinaram os dados de ambas as missões para produzir um mapa da emissão de poeira em 3000 GHz. [Finkbeiner et al. \(1999\)](#) extrapolaram este mapa para as frequências de microondas.

Na Figura 2.3 é apresentado o mapa obtido por [Finkbeiner et al. \(1999\)](#) em 94 GHz em unidades de mK. Eles ajustaram os dados de [Schlegel et al. \(1998\)](#) para um modelo particular de duas componentes com índices $\alpha_1 = 1,64$ e $\alpha_2 = 2,7$, e temperaturas de $T_1 = 9,4 \text{ K}$ e $T_2 = 16,2 \text{ K}$, correspondendo aos grãos de carbonato e silicato, respectivamente. A fração emitida por cada componente é $f_1 = 0,0363$ e $f_2 = 0,9637$.

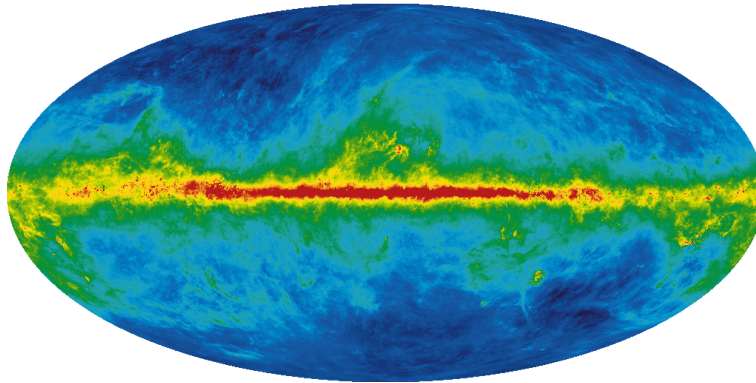


Figura 2.3 - Mapa da emissão de poeira em 94 GHz. FONTE: [Finkbeiner et al. \(1999\)](#)

3 MAPAS DO EXPERIMENTO GEM

Os mapas que usamos para estudar a emissão sincrotron são baseados nos dados do experimento GEM, em conjunto com outros mapas conhecidos na literatura. Neste Capítulo descrevemos brevemente as características do telescópio GEM e dos mapas GEM.

3.1 O Experimento GEM

O GEM é uma colaboração internacional que tem as seguintes instituições envolvidas: Lawrence Berkeley National Laboratory e University of California at Berkeley, EUA; Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil; Instituto de Telecomunicações (Organização Privada), Portugal; Centro Multidisciplinar em Astrofísica do Instituto Superior Técnico e da Universidade do Algarve, Portugal; Centro Internacional de Física, Colômbia; Laboratório de Física Cósmica, Itália; Universidade de Milão, Itália; Universidade de Roma, Itália; Instituto de Astrofísica das Canárias, Espanha. Atualmente, a antena do projeto GEM se encontra nas instalações do INPE, em Cachoeira Paulista - SP mapeando uma área de 45% do céu ($-52^\circ < \delta < +7^\circ$) (ver Figura 3.1).

O GEM tem por objetivo o estudo detalhado e mapeamento do contínuo da emissão Galáctica nas frequências de 408 MHz; 1465 MHz; 2,3 GHz; 5 GHz e 10 GHz. Este estudo visa entender em detalhes as variações espaciais e espectrais da componente sincrotron, sendo necessário para minimizar a contaminação deste sinal nas medidas da RCFM.



Figura 3.1 - Fotografia do radiotelescópio do projeto GEM instalado no sítio de Cachoeira Paulista.

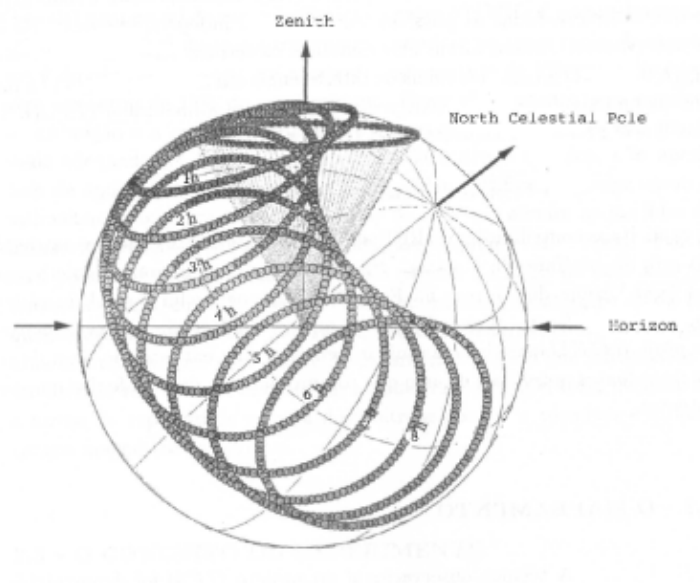


Figura 3.2 - Ilustração do esquema de varredura. FONTE: [Tello et al. \(2007\)](#).

3.2 O Telescópio GEM

O GEM usa um refletor parabólico Scientific Atlanta de 5,5 m de diâmetro, onde são instalados receptores de potência total em 408 MHz, 1465 MHz e 2300 MHz, e do tipo Dick em 5000 MHz e 10000 MHz. O instrumento pode ser desmontado e instalado em diferentes sítios, evitando assim efeitos sistemáticos oriundos da utilização de instrumentos diferentes para se obter uma cobertura total do céu.

O GEM possui uma técnica de varredura que utiliza montagem alto-azimutal, com base giratória, direcionando o feixe de forma a manter o ângulo zenital fixo em 30° . Este tipo de varredura possui a vantagem de manter a coluna atmosférica observada constante, mantendo assim constante o efeito deste contaminante, assim como mantendo constante a contaminação proveniente do solo. O esquema de varredura é ilustrado na Figura 3.2.

Ainda para diminuir a influência da radiação do solo e diminuir os efeitos de difração, que geram os *stripes* que degradam a qualidade dos mapas, foram tomadas as seguintes medidas:

- escolha de locais de observação em regiões nos quais o perfil do horizonte esteja abaixo de 10° ;
- construção de uma tela de alumínio de 5 m de altura contornando o radiotelescópio, a 15m do centro da antena;

- montagem de painéis metálicos planos de extensão na periferia do refletor, o que aumenta o diâmetro da antena para 8,9 m.

3.3 Os mapas GEM

As medidas em 408 MHz, 1465 MHz, 2300 MHz foram feitas em Bishop nos EUA durante 1993 e 1994, Villa de Leyva na Colômbia em 1995, Tenerife na Espanha durante 1995 e 1997 e Cachoeira Paulista no Brasil entre 1998 e 2005. Na Tabela 3.1 estão resumidas as campanhas de observação do GEM de intensidade total de radiação. Também foram feitas medidas de polarização da emissão Galáctica em 5000 MHz em Cachoeira Paulista, Brasil (ver mais detalhes em [Ferreira \(2008\)](#)). Neste trabalho estamos interessados nos dados de intensidade total.

Para a manipulação e visualização dos dados do GEM são utilizadas as rotinas do HEALPix (*Hierarchical Equal Area and isoLatitude Pixelization*) ([Górski; et al., 1999](#)). Este é um sistema de pixelização da esfera celeste também utilizado para manipular os dados da RCFM. Na pixelização HEALPix o tamanho angular do pixel é definido pelo parâmetro N_{side} . O número de pixel, N_{pix} , do mapa é dado pela expressão $N_{pix} = 12 \times N_{side}^2$.

Os mapas GEM são feitos utilizando o valor $N_{side} = 512$ e o número total de pixels é $N_{pix} = 3145728$, que corresponde a uma resolução de pixel de $0,11^\circ$. A resolução angular efetiva dos mapas está entre $\sim 10^\circ$ e $\sim 2^\circ$ nas faixas de 408 MHz e 2300 MHz. Neste trabalho utilizaremos apenas os dados em 2300 MHz, visto que este mapa apresenta uma melhor resolução angular e uma maior cobertura do céu.

Tabela 3.1 - Mapas do Radiotelescópio GEM

referência	frequência (MHz)	resolução (HPBW)	cobertura do céu
Torres et al. (1996)	408	$11, 3^\circ$ ⁽¹⁾	$-24^\circ < \delta < +36^\circ$
Rodrigues (2000)	408	$10, 5^\circ$ ⁽²⁾	$+07^\circ < \delta < +67^\circ$
Tello (1997)	1465	$4, 2^\circ$ ⁽²⁾	$+07^\circ < \delta < +67^\circ$
Tello et al. (2005)	1465	$4, 2^\circ$ ⁽³⁾	$-52^\circ < \delta < +8^\circ$
Tello et al. (2008)	1465	$4, 2^\circ$ ⁽³⁾	$-52^\circ < \delta < +8^\circ$
Tello et al. (2007)	2300	$2, 3^\circ \times 1, 8^\circ$ ^{(1) e (3)}	$-52^\circ < \delta < +36^\circ$
Torres (1995)	2300	$3, 7^\circ$ ⁽¹⁾	$-24^\circ < \delta < +36^\circ$

⁽¹⁾ Villa de Leyva, Colômbia; ⁽²⁾ Bishop, EUA; ⁽³⁾ Cachoeira Paulista, Brasil

Tabela 3.2 - Mapa em 2300 MHz

Sítio	Cachoeira Paulista, Brasil	Villa de Leyva, Colômbia
resolução (HPBW)	$2,31^\circ \times 1,82^\circ$	$2,30^\circ \times 1,92^\circ$
Cobertura do Céu	$-52^\circ < \delta < +8^\circ$	$-24^\circ < \delta < +36^\circ$
Cobertura do Céu %	46,8	46,3
Frequência	2300	2300
Altitude (m.a.s.l.)	572	2173
Ano	1999	1995
Duração (h)	532	231

FONTE: Tello et al. (2007)

3.4 O mapa em 2300 MHz

O mapa de 2300 MHz foi montado a partir das campanhas de observações do GEM de Cachoeira Paulista, Brasil, e de Villa de Leyva, Colômbia. Algumas características destas observações estão resumidas na Tabela 3.2.

Os dados de 2300 MHz foram processados usando FFT (*Fast Fourier transform*) para eliminar os *stripes*. Na Figura 3.3 é apresentado o mapa em 2300 MHz com resolução angular de $\sim 2^\circ$ e cobertura total do céu de 69%. Este mapa está em coordenadas galácticas e a temperatura em Kelvin.

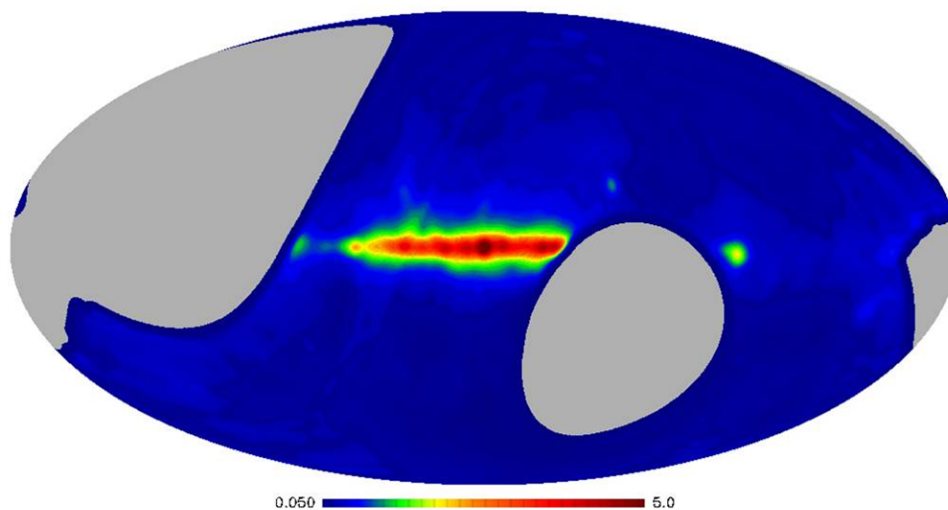


Figura 3.3 - Mapa de intensidade total da emissão sincrotron em 2300 MHz. O mapa está em coordenadas Galácticas e a temperatura em Kelvin.

4 METODOLOGIA

Neste Capítulo, descrevemos o método para obter os modelos das componentes de emissão Galáctica e o método usado para minimizar a contaminação Galáctica nas medidas da RCFM nos dados de três anos do WMAP. Também apresentamos os mapas obtidos com estes métodos.

4.1 Modelos das Componentes de Emissão Galáctica

Para o estudo cosmológico é preciso dispor de um mapa com o sinal da RCFM livre das emissões contaminantes. Por isso, é importante conhecer as componentes de emissão Galáctica e as variações espaciais e espectrais de cada componente. Para obter os modelos das componentes de emissão Galáctica, nós utilizamos o Método de Máxima Entropia (doravante MEM) (veja, e.g., [Press et al. \(1992\)](#)). Na nossa análise, utilizamos os dados do GEM na frequência de 2300 MHz combinados com dados de emissão Galáctica disponíveis na literatura.

4.1.1 Método de Máxima Entropia

O modelo de temperatura de cada pixel p e para cada frequência ν dos mapas do WMAP é dado por

$$T_m(\nu, p) \equiv T_{\text{RCF}}(p) + \sum_c S_c(\nu, p) T_c(p), \quad (4.1)$$

em que RCF representa a RCFM e c as componentes de emissão sincrotron, emissão bremsstrahlung e emissão térmica de poeira, $T_c(p)$ é a distribuição espacial e $S_c(\nu, p)$ é o espectro da emissão da componente c . Os espectros da emissão sincrotron e emissão bremsstrahlung são normalizados para a banda K, e o espectro de emissão térmica de poeira é normalizado para a banda W ($S \equiv 1$).

As componentes da emissão Galáctica, $T_c(p)$, podem ser obtidas por um processo de minimização. Supondo $A(p)$ e $B(p)$ duas funções positivas de $T_c(p)$, minimizamos a função $A(p)$ e a função $B(p)$ igualando a zero suas derivadas. Naturalmente obteremos resultados diferentes para $T_c(p)$ usando diferentes funções. Uma melhor alternativa é minimizar a função $A(p)$ com relação a $B(p)$. Isto pode ser feito utilizando o método de multiplicadores de Lagrange, definido como

$$\nabla H(p) \equiv \nabla A(p) - \lambda(p) \nabla B(p), \quad (4.2)$$

em que $A(p) \equiv \chi^2 = \sum_{\nu} [T'_{\text{WMAP}}(\nu, p) - T'_m(\nu, p)]^2 / \sigma^2$, $T'_{\text{WMAP}}(\nu, p)$ denotam os dados de três anos do WMAP e $T'_m(\nu, p)$ é o modelo de temperatura, ambos sem a estimativa do sinal da RCFM, porque queremos obter somente as componentes de emissão Galáctica. Ademais, $B(p) = \sum_c T_c(p) - P_c(p) - T_c(p) \ln[T_c(p)/P_c(p)]$ é a função de máxima entropia, $P_c(p)$ é a distribuição espacial das componentes de emissão Galáctica conhecida *a priori*, e $\lambda(p)$ é o multiplicador de Lagrange.

$A(p)$ representa o modelo direto enquanto $B(p)$ funciona como um parâmetro de regularização. $\lambda(p)$ é o parâmetro que realiza o balanço entre $A(p)$ e $B(p)$. A função $A(p)$ é o termo da diferença quadrática entre os dados, $T'_{\text{WMAP}}(\nu, p)$, e o modelo de temperatura, $T'_m(\nu, p)$. A função de máxima entropia, $B(p)$, é a medida da divergência entre $T_c(p)$ e $P_c(p)$, ou seja, quanto maior a diferença entre $T_c(p)$ e $P_c(p)$, maior será $B(p)$ e quanto mais parecidas forem $T_c(p)$ e $P_c(p)$ menor será o valor de $B(p)$. No limite quando $T_c(p)$ for igual a $P_c(p)$, teremos $B(p) = 0$.

4.1.2 Implementação Numérica do Algoritmo

Para obter a distribuição espacial das componentes de emissão Galáctica pela minimização da função $H(p)$, definida na Equação 4.2, precisamos de um método iterativo. Para isso, utilizamos o método Newton-Raphson cujo passo de iteração é dado por

$$T_c(p)_{n+1} = T_c(p)_n - [\nabla^2 H(p)]^{-1} \nabla H(p), \quad (4.3)$$

em que n é o número da iteração, $\nabla H(p) \equiv \nabla A(p) - \lambda(p) \nabla B(p)$ é o vetor gradiente da função $H(p)$, e $\nabla^2 H(p) \equiv \nabla^2 A(p) - \lambda(p) \nabla^2 B(p)$ é a matriz Hessiana obtida a partir das derivadas parciais de segunda ordem de $H(p)$. A matriz Hessiana é interpretada como uma correção na direção oposta ao gradiente da função $H(p)$ de forma a acelerar o processo iterativo.

Os vetores gradientes das funções A e B são, respectivamente

$$\nabla A = 2 \left[\sum_{\nu} \sum_c \frac{S_c(\nu, p) T_c(p)}{\sigma^2} - \sum_{\nu} \frac{T(\nu, p)}{\sigma^2} \right] S_c(\nu, p), \quad (4.4)$$

$$\nabla B = -\ln \left[\frac{T_c(p)}{P_c(p)} \right]. \quad (4.5)$$

As matrizes Hessianas das funções A e B são, respectivamente

$$\nabla^2 A = 2 \left[\sum_{\nu} \frac{S_c(\nu, p) S_c(\nu, p)}{\sigma^2} \right], \quad (4.6)$$

$$\nabla^2 B = - \left[\frac{1}{T_c(p)} \right]. \quad (4.7)$$

O valor de $\lambda(p)$ varia pixel a pixel porque os ajustes são feitos independentemente para cada um deles. O valor de $\lambda(p)$ foi obtido pela relação: $0,6[T_K(p)/\text{mK}]^{-1,5}$, em que $T_K(p)$ é o mapa do WMAP na banda K com a estimativa do sinal da RCFM subtraída, em temperatura de antena (Hinshaw et al., 2007). Os valores de $\lambda(p)$ variam entre $0,2 < \lambda < 3$.

A seguir descreveremos os mapas de entrada (Subseção 4.1.3) e de saída (Subseção 4.1.4) do programa MEM.

4.1.3 Distribuições Espacial e Espectral

Calculamos a distribuição espacial do índice espectral da emissão sincrotron Galáctica utilizando os mapas baseados nos dados do GEM na frequência e 2300 MHz (Tello et al., 2007) junto com o mapa sincrotron de 408 MHz (Haslam et al., 1982) e o mapa sincrotron em 23 GHz (Hinshaw et al., 2007). Com isso, obtivemos um melhor detalhamento das variações do índice espectral da emissão sincrotron. Na Figura 4.1 é mostrado o mapa de variação espacial do índice espectral da emissão sincrotron $\beta_s(p)(408 \text{ MHz}, 2300 \text{ MHz}, 23 \text{ GHz})$ com resolução angular de 2° .

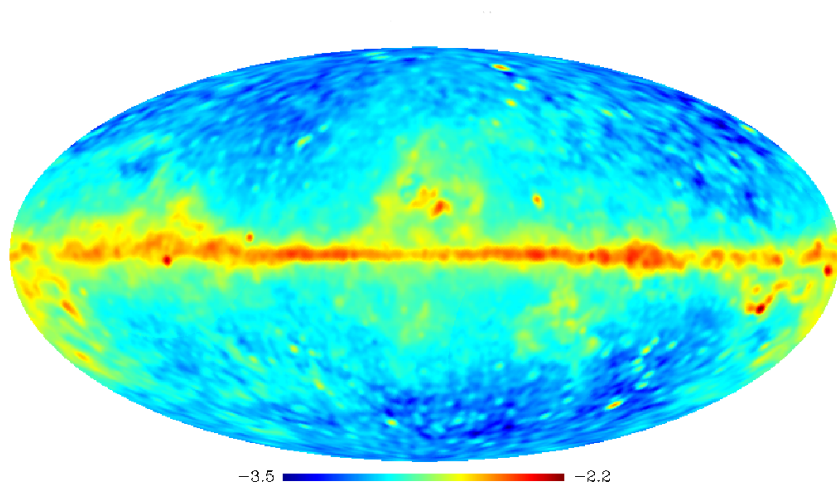


Figura 4.1 - Mapa do índice espectral da emissão sincrotron, $\beta_s(p)(408 \text{ MHz}, 2300 \text{ MHz}, 23 \text{ GHz})$.

O modelo do espectro de emissão da componente sincrotron é $S_s(\nu, p) = (\nu/\nu_K)^{\beta_s(p)-0,25[\beta_s(p)+3,5]}$ para a banda Ka e $S_s(\nu, p) = S_s(\nu_{Ka}, p)(\nu/\nu_{Ka})^{\beta_s(p)-0,17[\beta_s(p)+3,5]}$ para as bandas Q, V, e W (Hinshaw et al. (2007)). O modelo do espectro de emissão das componentes bremsstrahlung e poeira são $S_u(\nu) = (\nu/\nu_K)^{-2,14}$ e $S_p(\nu) = (\nu/\nu_W)^2$, respectivamente.

Para a emissão sincrotron o modelo *a priori* escolhido foi o mapa de 408 MHz (Haslam et al., 1982) extrapolado para a frequência de 23 GHz utilizando $\beta_s(p)(408 \text{ MHz}, 2300 \text{ MHz}, 23 \text{ GHz})$. Para a componente bremsstrahlung, o modelo *a priori* escolhido foi o mapa H_α produzido por Finkbeiner (2003). Este mapa foi convertido em um mapa bremsstrahlung em 23 GHz usando o fator de conversão $11,4 \mu\text{K R}^{-1}$. Para emissão de poeira utilizamos o mapa de Finkbeiner et al. (1999) em 94 GHz. Também utilizamos os mapas de três anos do WMAP para a estimativa do sinal Galáctico e o mapa ILC três anos para a estimativa do sinal da RCFM. Todos estes mapas estão disponíveis no site LAMBDA (*Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis*)¹.

O mapa do GEM em 2300 MHz possui uma resolução angular de $\sim 2^\circ$ (FWHM). Os mapas de emissão sincrotron em 408 MHz, o mapa H_α , o mapa de emissão de poeira e os mapas do WMAP possuem resolução angular entre $6' - 1^\circ$. Para evitar efeitos associados à diferença de resolução entre os diferentes mapas, degradamos todos eles à resolução do mapa GEM em 2300 MHz. Para isso usamos o programa *smoothing* do HEALPix.

4.1.4 Mapas MEM

Na Figura 4.2 é mostrada a distribuição espacial das componentes de emissão sincrotron, bremsstrahlung e emissão térmica de poeira, obtida pelo MEM. Estes mapas foram obtidos utilizando o parâmetro $N_{side} = 256$. O número total de pixels nestes mapas é $N_{pix} = 786\,432$ que corresponde a uma resolução de pixel de $0,23^\circ$. Os mapas estão em coordenadas galácticas e em temperatura de antena.

Conhecendo a distribuição espacial, $T_c(p)$, e a distribuição espectral, $S_c(\nu, p)$, das diferentes componentes de emissão Galáctica, obtivemos os mapas de emissão Galáctica nas frequências do WMAP de acordo com

$$T_{\text{gal}}(\nu, p) = S_s(\nu, p)T_s(p) + S_b(\nu, p)T_b(p) + S_p(\nu, p)T_p(p), \quad (4.8)$$

¹<http://lambda.gsfc.nasa.gov/>

em que s é a emissão sincrotron, b é a emissão bremsstrahlung e p é a emissão térmica de poeira. Na Figura 4.3 são mostrados os mapas de emissão Galáctica nas cinco frequências do WMAP obtidos somando os mapas MEM das componentes de emissão sincrotron, bremsstrahlung e emissão térmica de poeira.

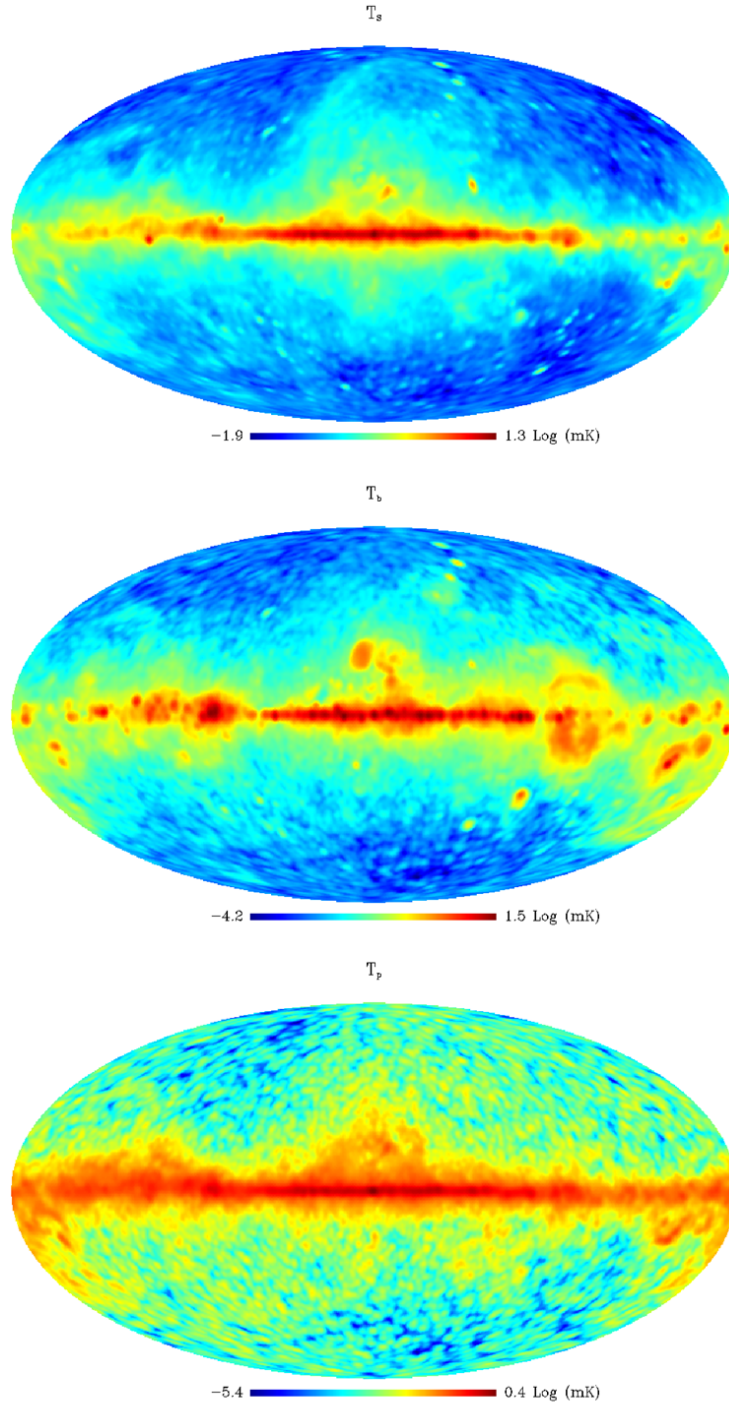


Figura 4.2 - Distribuição espacial das componentes de emissão sincrotron, bremsstrahlung e emissão térmica de poeira, obtidos pelo MEM.

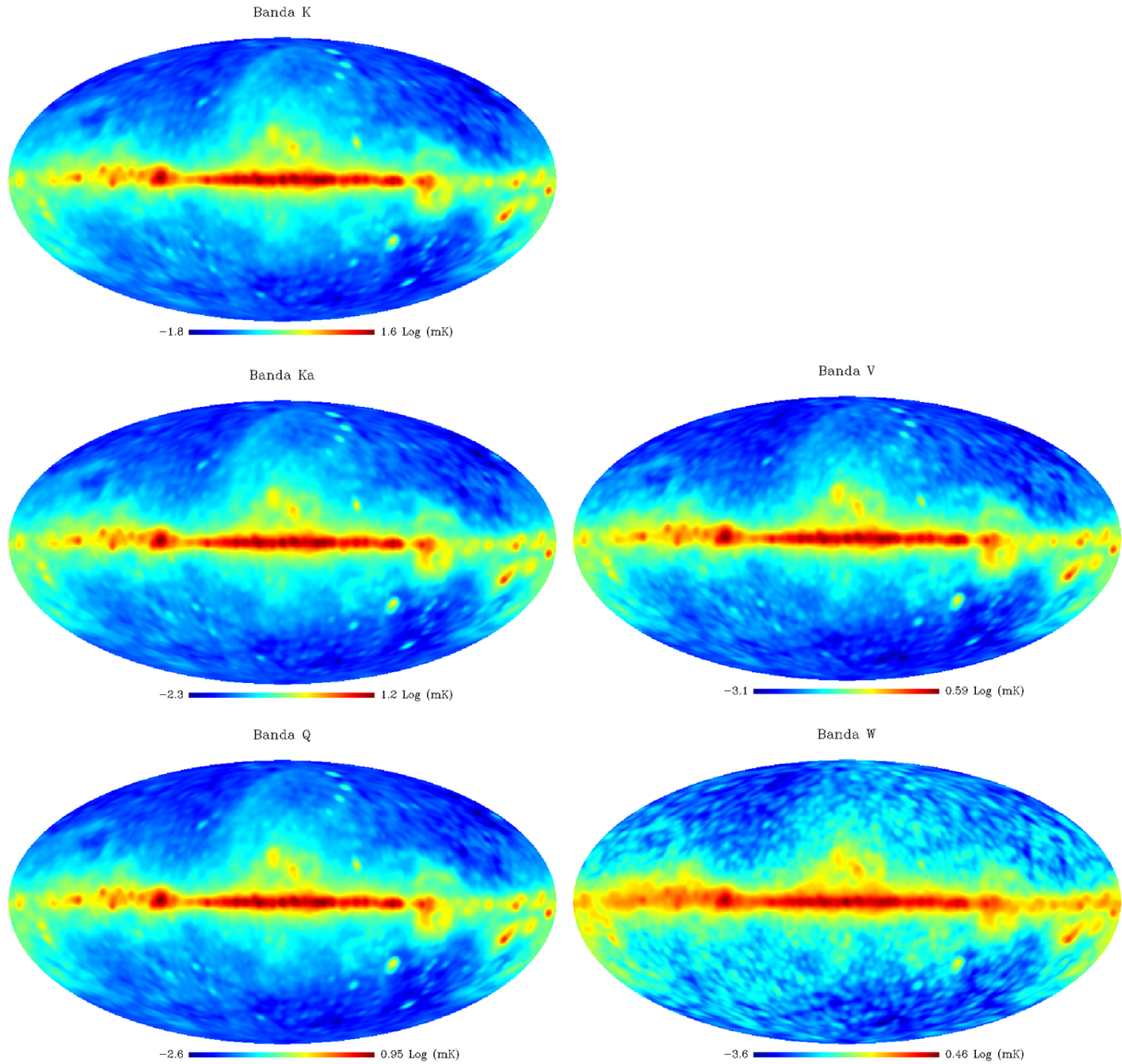


Figura 4.3 - Mapas de emissão Galáctica nas frequências do WMAP obtidos pela soma das componentes de emissão sincrotron, bremsstrahlung e emissão térmica de poeira.

4.2 Método de Minimização da Contaminação das Medidas da RCFM

Um método utilizado para limpar os mapas da RCFM é o de Combinação Linear Interna (ILC, do inglês). O método ILC foi criado pela equipe do WMAP (Bennett et al., 2003b; Hinshaw et al., 2007) e está sendo usado e generalizado por outros grupos para o estudo das anisotropias da RCFM (Tegmark et al., 2003; de Oliveira-Costa; Tegmark, 2006; Park et al., 2007). O método consiste em combinar os mapas das cinco bandas de frequências do WMAP com coeficientes que são escolhidos de modo a minimizar o sinal Galáctico.

4.2.1 Método de Combinação Linear Interna

O sinal da RCFM observado em diferentes frequências é contaminado pelas componentes de emissão Galáctica, assim podemos escrever

$$T(\nu, p) = T_{\text{rcf}}(p) + T_{\text{gal}}(\nu, p), \quad (4.9)$$

em que T_{rcf} é o sinal da RCFM, T_{gal} é o sinal Galáctico, ν é a frequência e p é o pixel. A combinação linear dos mapas é definida como

$$T_{\text{ilc}}(p) = \sum_{\nu} \omega(\nu) T(\nu, p), \quad (4.10)$$

em que $\omega(\nu)$ são os coeficientes da combinação linear. O sinal da RCFM, em temperatura termodinâmica, contribui igualmente em todas as frequências por causa do espectro de corpo negro, enquanto que a contribuição do sinal Galáctico muda com a frequência (veja, e.g., [Bennett et al. \(2003b\)](#)). Então, para conservar o sinal da RCFM a soma dos coeficientes tem que obedecer a equação $\sum_{\nu} \omega(\nu) = 1$. Combinando as Equações 4.9 e 4.10 tem-se

$$\sum_{\nu} \omega(\nu) T(\nu, p) = T_{\text{rcf}}(p) + \sum_{\nu} \omega(\nu) T_{\text{gal}}(\nu, p). \quad (4.11)$$

Os coeficientes são escolhidos de tal forma que

$$\sum_{\nu} \omega(\nu) T_{\text{gal}}(\nu, p) = 0. \quad (4.12)$$

Um método conveniente para obter isto é fazer a variância de $T_{\text{ilc}}(p)$, isto é

$$\sigma^2(T_{\text{ilc}}) = \frac{1}{N_{\mathcal{R}}} \sum_{p \in \mathcal{R}} \left[\{T_{\text{rcf}}(p) - \bar{T}_{\text{rcf}}\} + \sum_{\nu} \omega(\nu) \{T_{\text{gal}}(\nu, p) - \bar{T}_{\text{gal}}(\nu)\} \right]^2, \quad (4.13)$$

onde $N_{\mathcal{R}}$ é o número de pixels na região $\mathcal{R}$, e $\bar{T}$ a média de $T(p)$. Os coeficientes $\omega(\nu)$ são calculados em cada região $\mathcal{R}$ pela minimização da variância de $T_{\text{ilc}}(p)$. A solução de $\mathbf{w} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5]$ é

$$\mathbf{w} = -\mathbf{G}^{-1}\mathbf{C}. \quad (4.14)$$

em que a matriz $\mathbf{G}$ e o vetor $\mathbf{C}$ são,

$$G_{ij} = \frac{1}{N_{\mathcal{R}}} \sum_{p \in \mathcal{R}} [T_{\text{gal}}(\nu_i, p) - \bar{T}_{\text{gal}}(\nu_i)] [T_{\text{gal}}(\nu_j, p) - \bar{T}_{\text{gal}}(\nu_j)], \quad (4.15)$$

$$C_j = \frac{1}{N_{\mathcal{R}}} \sum_{p \in \mathcal{R}} [T_{\text{rcf}}(p) - \bar{T}_{\text{rcf}}] [T_{\text{gal}}(\nu_j, p) - \bar{T}_{\text{gal}}(\nu_j)], \quad (4.16)$$

e $i, j = 1, \dots, 5$.

O método ILC será mais eficiente se aplicado separadamente em regiões que contenham pixels com as mesmas variações espectrais. Para levar em conta estas variações o WMAP dividiu o céu em doze regiões, sendo onze localizadas no plano da Galáxia (ver Figura 4.4). Neste trabalho será utilizada a mesma divisão em regiões.

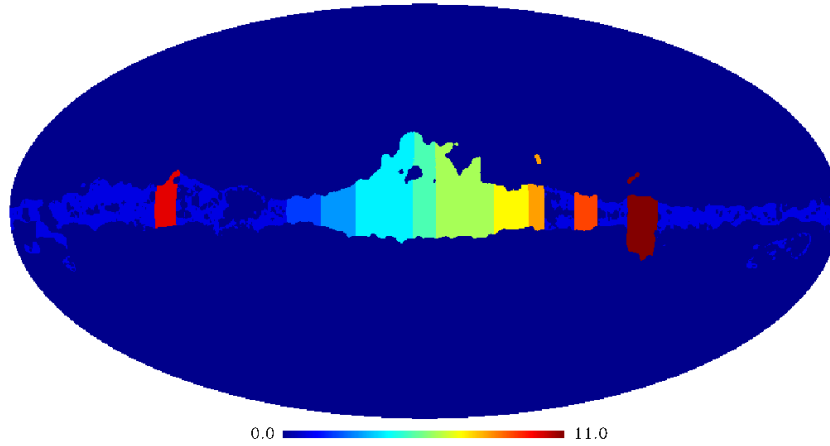


Figura 4.4 - Mapa das 12 regiões. FONTE: [Hinshaw et al. \(2007\)](#).

4.2.2 Mapa ILC

Nós aplicamos o método ILC aos dados de três anos do WMAP. Para as componentes de emissão Galáctica usamos os mapas obtidos pelo MEM, e para estimativa do sinal da RCFM usamos o mapa ILC três anos do WMAP. Os mapas da RCFM são expressos em

Tabela 4.1 - Coeficientes ω por Regiões

Região	Banda K	Banda Ka	Banda Q	Banda V	Banda W
0	0.1191	-0.7223	-0.1250	2.1286	-0.4003
1	-0.1873	0.8515	-1.5538	2.1575	-0.2679
2	-0.3069	0.3887	0.5520	-0.5916	0.9577
3	-0.0898	0.0205	-0.2792	1.6544	-0.3059
4	-0.1969	1.0951	-1.8439	1.8636	0.0821
5	0.2644	-0.9765	-0.5508	3.1424	-0.8794
6	-0.3125	1.0927	-0.9079	0.2557	0.8719
7	0.1476	-0.7891	-0.0479	2.2322	-0.5428
8	0.6517	-2.8130	1.2543	2.8070	-0.8996
9	0.0362	-0.3324	-0.3949	1.9590	-0.2680
10	0.1656	-0.7869	-0.3173	3.0200	-1.0813
11	0.2214	-0.9117	-0.3265	2.6544	-0.6375

temperatura termodinâmica e os mapas de emissão Galáctica em termos da temperatura de antena. A conversão é dada por (ver, e.g., [Bennett et al. \(2003b\)](#))

$$\Delta T_A = \Delta T[(e^x - 1)^2/x^2 e^x]^{-1}, \quad (4.17)$$

em que $x = h\nu/kT_0$, h é a constante de Planck, k é a constante de Boltzmann, ν é a frequência e T_0 é a temperatura de corpo negro da RCFM.

Os coeficientes do método ILC foram calculados separadamente para cada uma das 12 regiões definidas pelo WMAP, usando as Equações 4.14, 4.15 e 4.16. Para conservar o sinal da RCFM, normalizamos os coeficientes na Equação 4.14 para que a soma dos pesos seja igual à unidade. Nossos coeficientes são significativamente diferentes dos coeficientes encontrados por [Hinshaw et al. \(2007\)](#) que calcularam os coeficientes utilizando o método de multiplicadores de Lagrange na minimização da variância da Equação 4.11. Os coeficientes que obtivemos para cada região são mostrados na Tabela 4.1.

Nós aplicamos os coeficientes aos dados de três anos do WMAP das cinco bandas de frequências utilizando a Equação 4.10. Para estimar a contaminação Galáctica residual no nosso mapa ILC (doravante CILC), também aplicamos os coeficientes aos mapas MEM produzidos com os dados do GEM (ver Figura 4.2), diferente da equipe do WMAP que estimou a emissão Galáctica residual utilizando simulação monte-carlo. Pode-se ver na Figura 4.5 que, exceto no plano da Galáxia, obtivemos $\sum_{\nu} \omega(\nu) T_{\text{gal}}(\nu, p) \simeq 0$. Nós utilizamos este resultado para corrigir o mapa CILC na Figura 4.6.

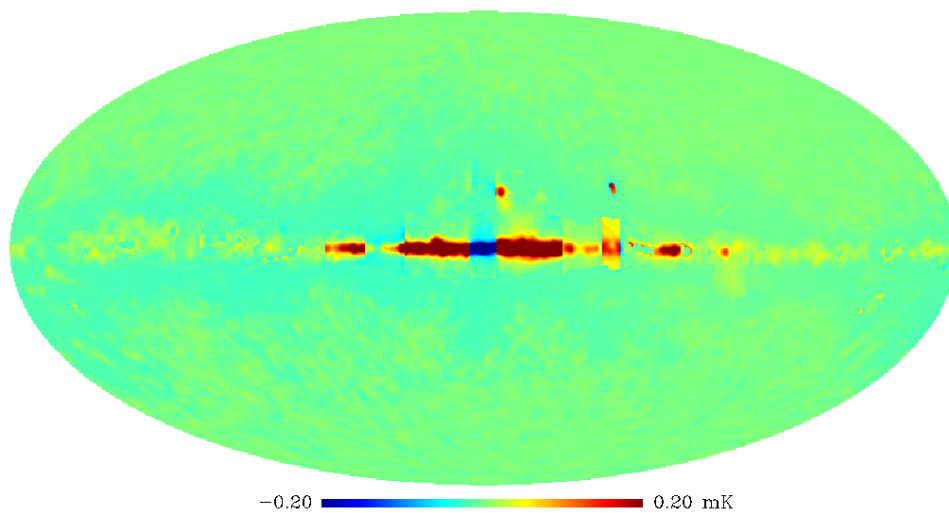


Figura 4.5 - Contaminação Galáctica residual.

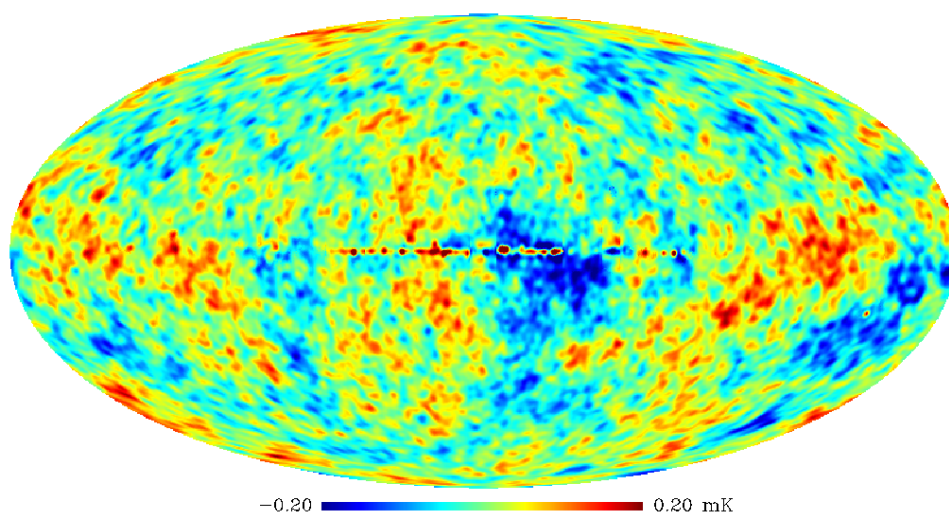


Figura 4.6 - Mapa CILC com os dados do GEM.

5 RESULTADOS

Neste Capítulo apresentamos uma análise do mapa CILC e também uma comparação com outros mapas do tipo ILC existentes na literatura que também foram contruídos com os dados de três anos do WMAP.

5.1 Mapas de Multifrequência

A comparação do CILC com os mapas [Hinshaw et al. \(2007\)](#), [Park et al. \(2007\)](#), [de Oliveira-Costa e Tegmark \(2006\)](#) (doravante WILC, SILC, TILC, respectivamente) é mostrada nas Figuras 5.1, 5.2, e 5.3. Todos os mapas foram suavizados para a resolução angular de 2° , e o monopolo e o dipolo foram removidos antes da comparação. O CILC é similar ao WILC com uma diferença de $\pm 0,1$ mK no plano Galáctico. Fora do plano Galáctico as estruturas estão distribuídas de forma uniforme, indicando semelhantes propriedades de ruído nos dois mapas. O CILC é diferente do SILC e do TILC principalmente próximo ao plano Galáctico, indicando a presença de emissão Galáctica residual. Em ambos os mapas estão presentes algumas fontes pontuais residuais, que estão associadas com as fontes reportadas pelo WMAP.

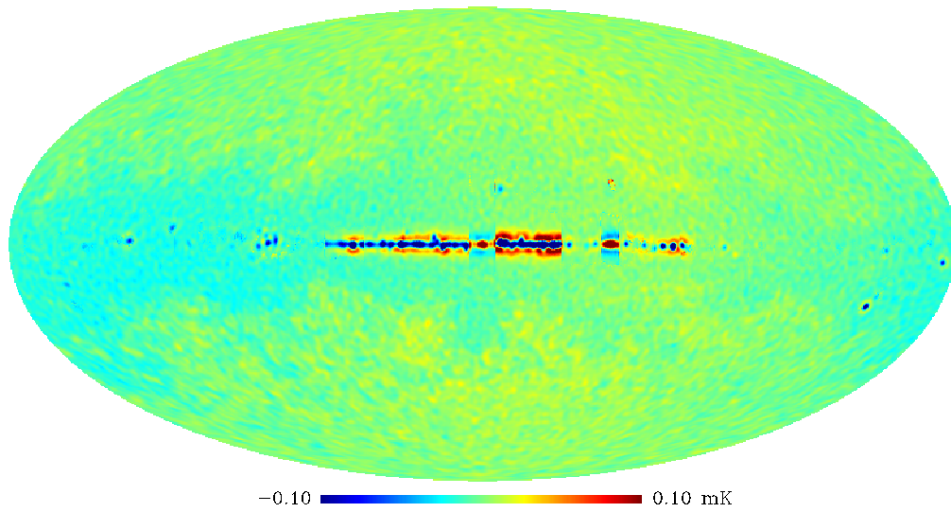


Figura 5.1 - Diferença entre o mapa CILC e o mapa WILC

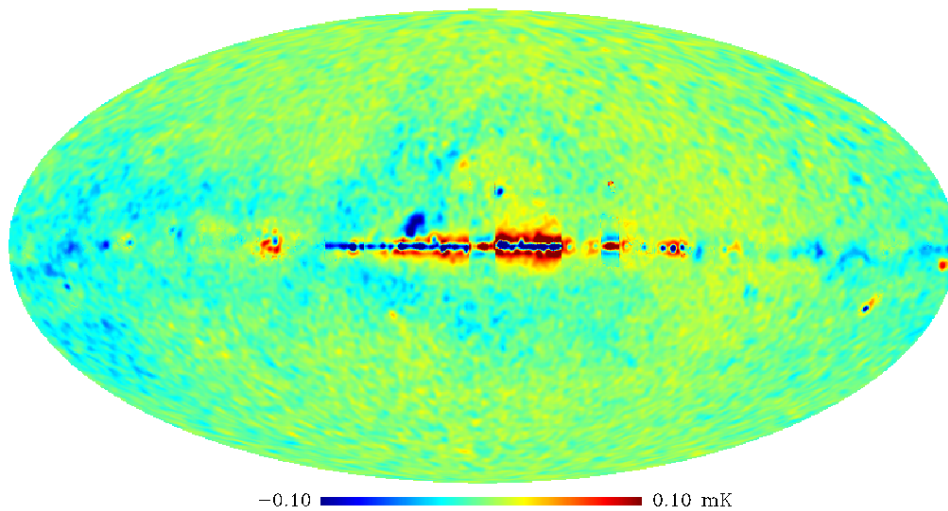


Figura 5.2 - Diferença entre o mapa CILC e o mapa SILC

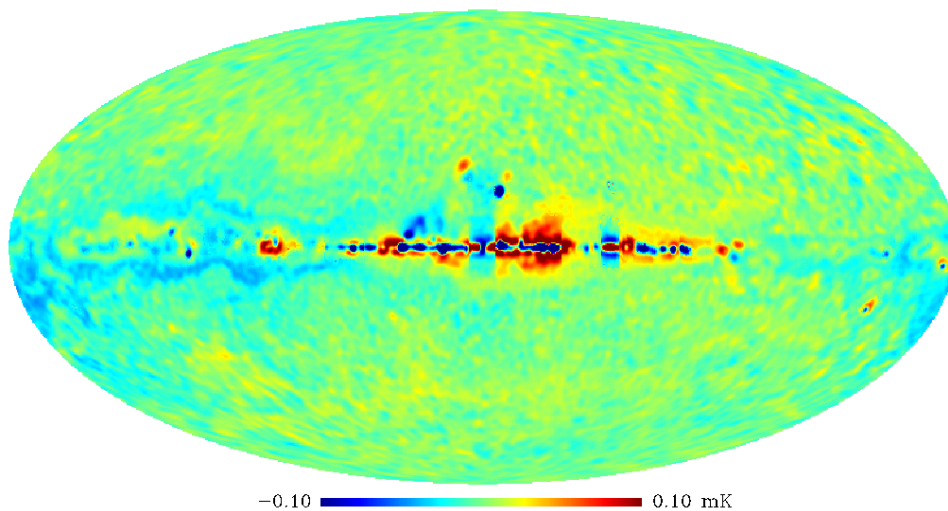


Figura 5.3 - Diferença entre o mapa CILC e o mapa TILC

Nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 é mostrada a correlação do mapa CILC com os mapas WILC, SILC e TILC na região fora do plano Galáctico, que corresponde a região zero da Figura 4.4. Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são mostradas as correlações na região do plano Galáctico. A correlação entre o mapa CILC e WILC é de 99% fora do plano Galáctico, e de 91% no plano Galáctico. A correlação entre o CILC e o SILC é de 98% fora do plano Galáctico, e

de 88% no plano Galáctico. E a correlação entre o CILC e o TILC é de 98% fora do plano Galáctico, e de 75% no plano Galáctico. O mapa CILC possui uma melhor correlação com o mapa WILC, que corrigiu a emissão Galáctica residual com simulação monte-carlo.

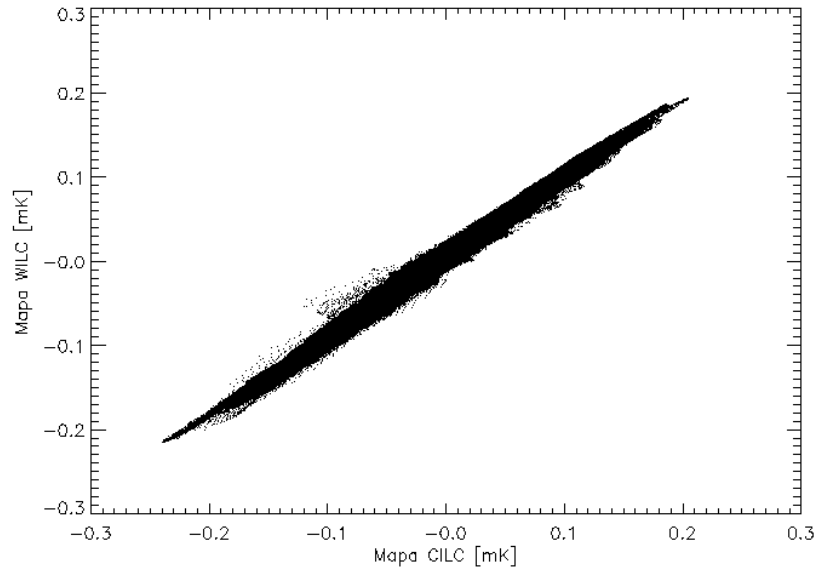


Figura 5.4 - Correlação entre os mapas CILC e WILC fora do plano Galáctico. A correlação é de 99%.

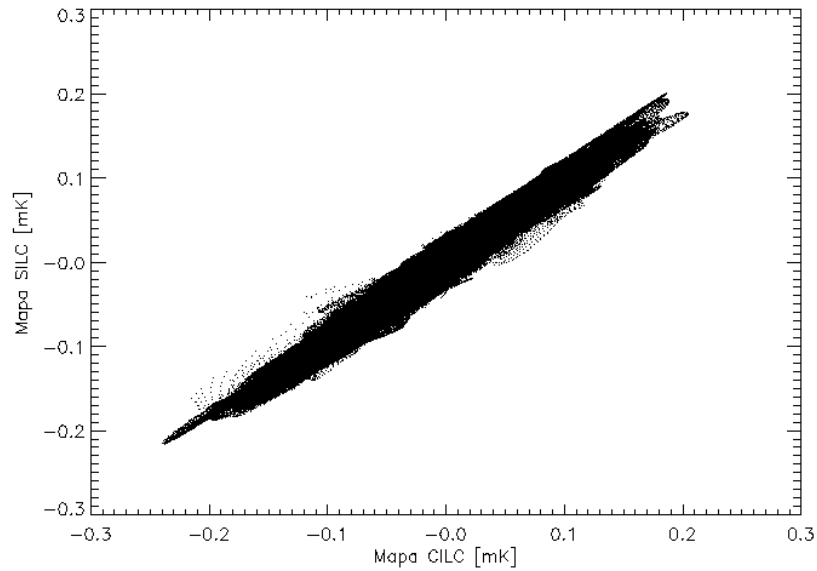


Figura 5.5 - Correlação entre os mapas CILC e SILC fora do plano Galáctico. A correlação é de 98%.

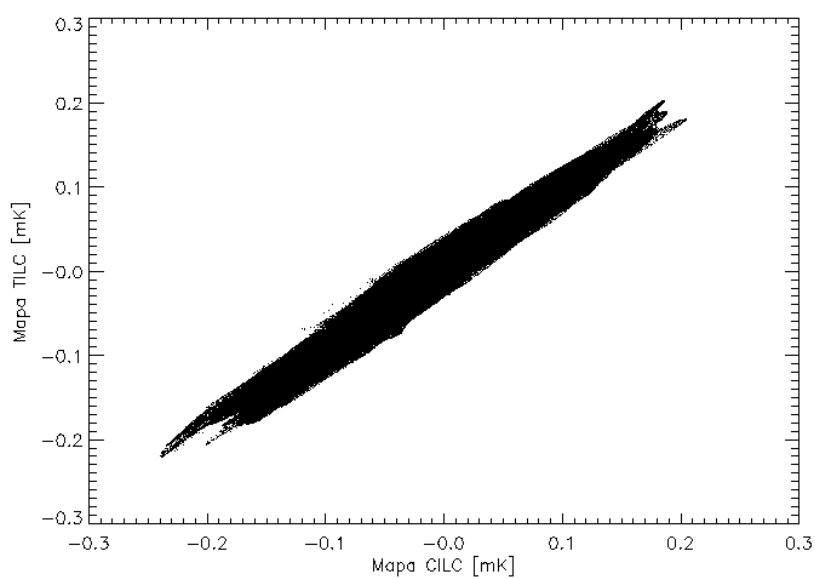


Figura 5.6 - Correlação entre os mapas CILC e TILC fora do plano Galáctico. A correlação é de 98%.

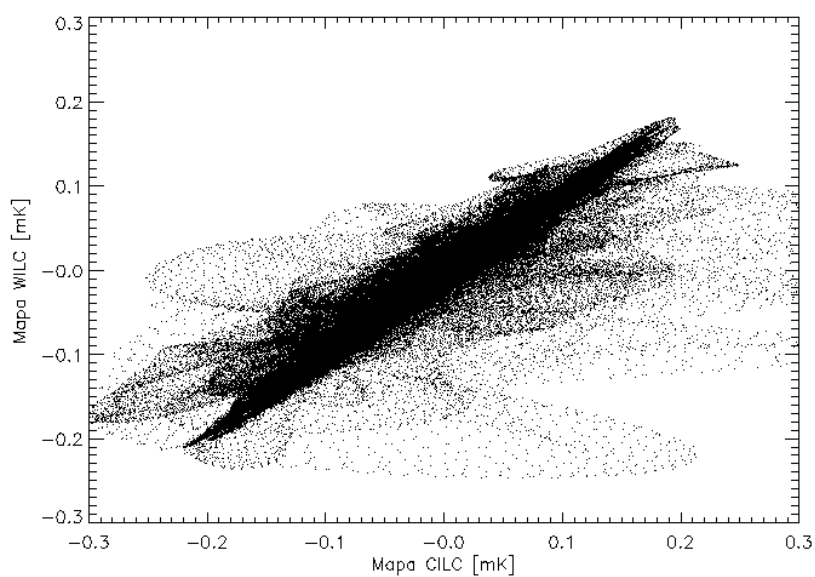


Figura 5.7 - Correlação entre os mapas CILC e WILC dentro do plano Galáctico. A correlação é de 91%.

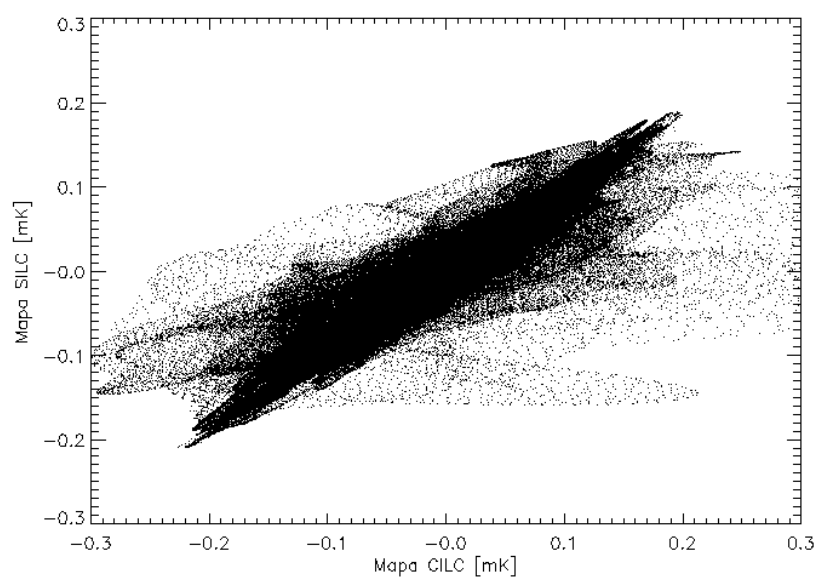


Figura 5.8 - Correlação entre os mapas CILC e SILC dentro do plano Galáctico. A correlação é de 88%.

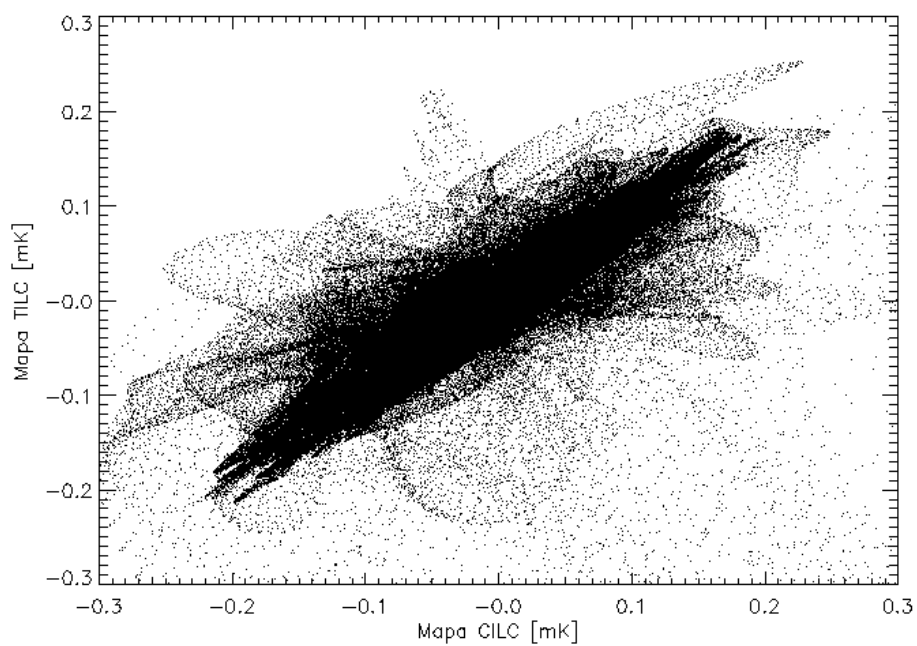


Figura 5.9 - Correlação entre os mapas CILC e TILC dentro do plano Galáctico. A correlação é de 75%.

Tabela 5.1 - Coeficientes dos harmônicos esféricos do mapa CILC para baixos multipolos

l	m	$Re[a_{lm}]$	$Im[a_{lm}]$	l	m	$Re[a_{lm}]$	$Im[a_{lm}]$
2	0	7.47	0.00	5	0	15.32	0.00
	1	-0.31	5.19		1	25.01	3.13
	2	-14.01	-19.07		2	-7.87	2.08
3	0	-6.41	0.00	3	3	18.76	1.45
	1	-11.78	0.55		4	-4.23	6.41
	2	22.29	0.90		5	9.30	22.17
4	3	-12.89	33.36	6	0	-1.89	0.00
	0	22.19	0.00		1	1.59	5.56
	1	-8.37	7.85		2	10.04	-4.44
	2	10.46	6.27		3	-8.29	-1.05
	3	7.41	-20.39		4	14.16	0.07
	4	-1.70	-11.13		5	-4.47	-3.05
	4				6	3.45	9.44

5.2 Anisotropias dos Mapas de Multifrequência para Multipolos de Baixa Ordem

Os coeficientes dos harmônicos esféricos do mapa CILC para baixos múltipolos são mostrados na Tabela 5.1. Os coeficientes foram gerados de acordo com a Equação 1.4 utilizando o programa *Anafast* do HEALPix. Os coeficientes a_{lm} para $l = 2$ do WILC são $a_{20} = 11.48$, $a_{21} = -0,05 + 4,86i$, e $a_{22} = -14,41 - 18,80i$. Para o SILC são $a_{20} = 7.51$, $a_{21} = -1,54 + 4,82i$, e $a_{22} = -18,54 - 18,01i$. Para o TILC são $a_{20} = 3.34$, $a_{21} = 0.26 + 4,88i$, e $a_{22} = -14,88 - 17,26i$. As amplitudes dos a_{2m} no mapa CILC são compatíveis com as amplitudes dos a_{2m} dos mapas do WILC e do SILC.

Na Tabela 5.2 são mostradas as potências do quadrupolo e do octopolo do modelo Λ CDM (Spergel et al., 2007) e dos mapas WILC, SILC, TILC e CILC, de acordo com $\delta T_l^2 \equiv l(l+1)C_l/2\pi$. Pode-se observar que os valores da potência do quadrupolo dos mapas analisados estão abaixo do valor previsto pelo modelo Λ CDM. No entanto, estes valores estão dentro das barras de erro previstas.

Tabela 5.2 - Potência do Quadrupolo e do Octopolo

Mapa	$\delta T_2^2 (\mu K^2)$	$\delta T_3^2 (\mu K^2)$
Λ CDM	1250	1143
WILC	248,204	1048,08
SILC	275,443	949,366
TILC	209,370	1035,10
CILC	234,813	1056,51

Os mapas CILC, WILC, SILC, TILC para os múltiplos $l = 2-6$ são mostrados nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14. Estes mapas foram gerados a partir do a_{lm} dos respectivos mapas de acordo com a Equação 1.2, utilizando o programa *Synfast* do HEALPix. É possível observar algumas propriedades nestes mapas, como por exemplo, o alinhamento entre o quadrupolo e octopolo. Estas características também aparecem em outros mapas de multipolos de baixa ordem ($l \leq 20$). Também pode-se observar a planaridade de alguns destes multipolos de baixa ordem, como por exemplo, no octopolo.

As propriedades de alinhamento, planaridade aparecem muito raramente nos mapas simulados obtidos com o modelo Λ CDM. Vários autores sugerem que esses fenômenos não são devidos à contaminação Galáctica nos mapas do tipo ILC, pois eles aparecem em todos os mapas analisados aqui.

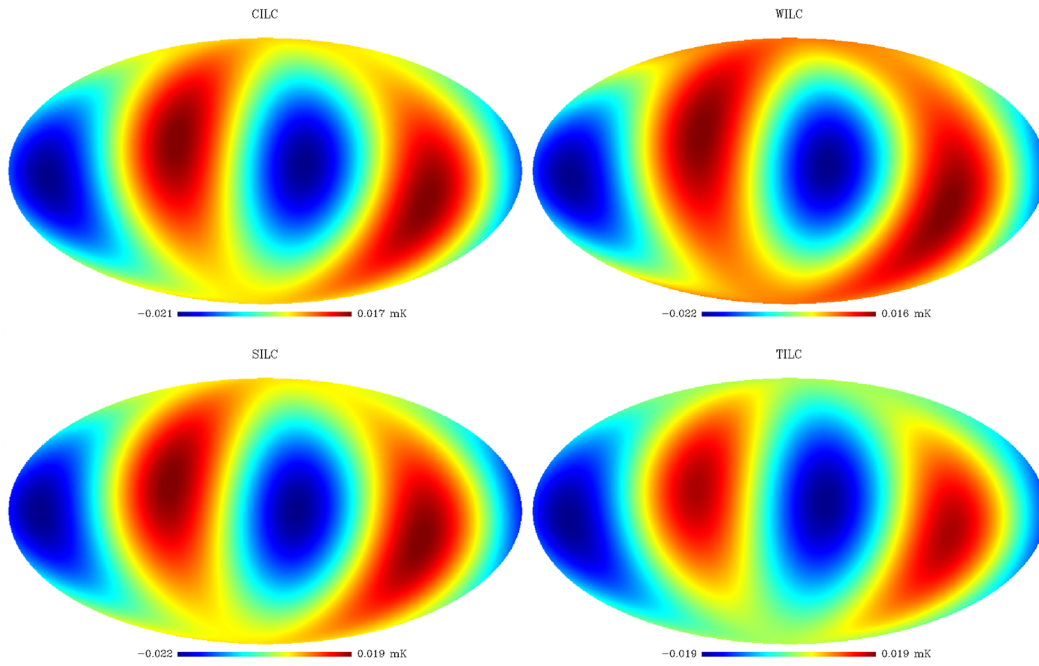


Figura 5.10 - Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 2$

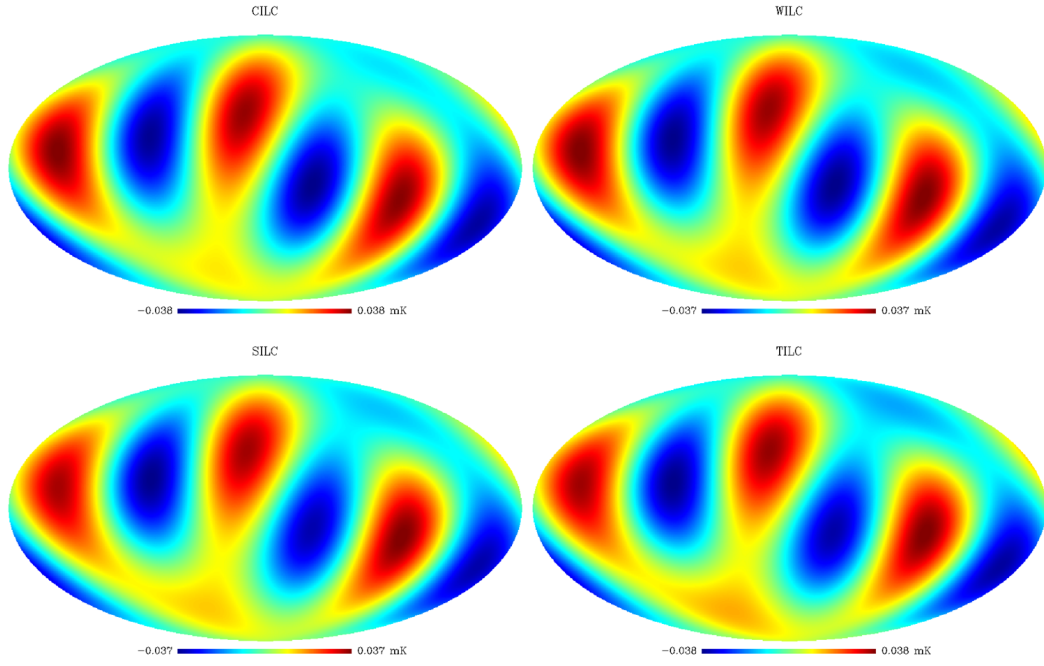


Figura 5.11 - Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 3$

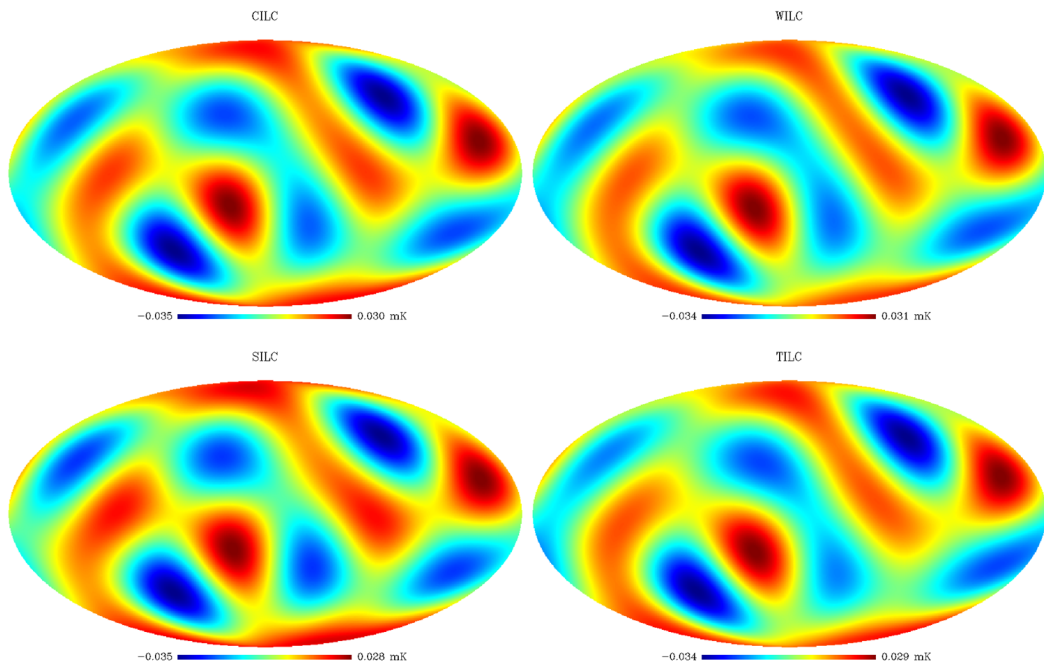


Figura 5.12 - Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 4$

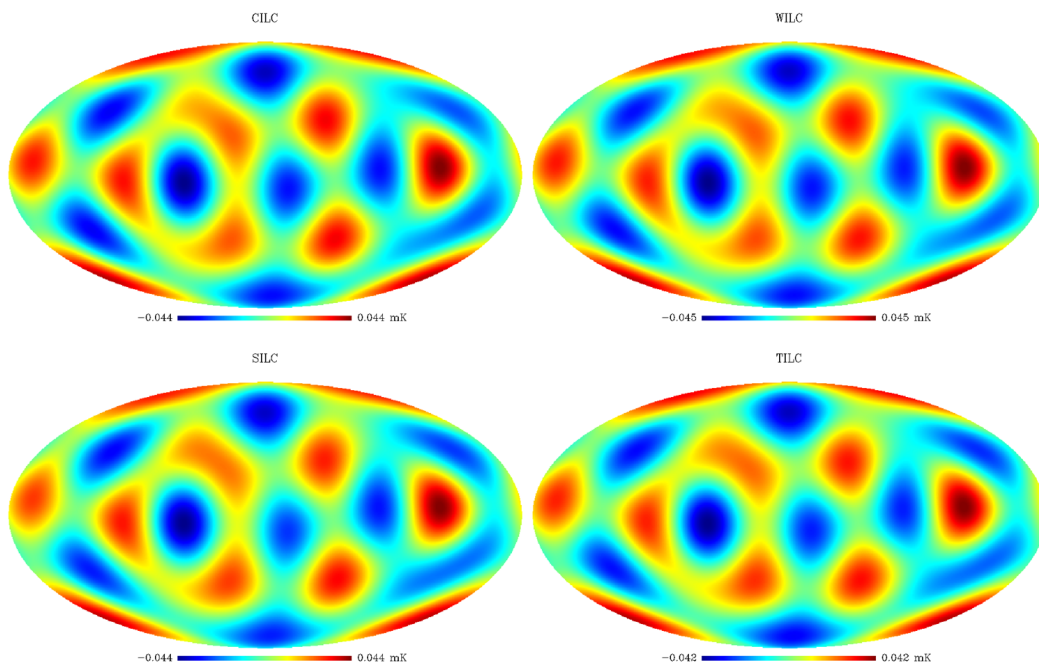


Figura 5.13 - Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 5$

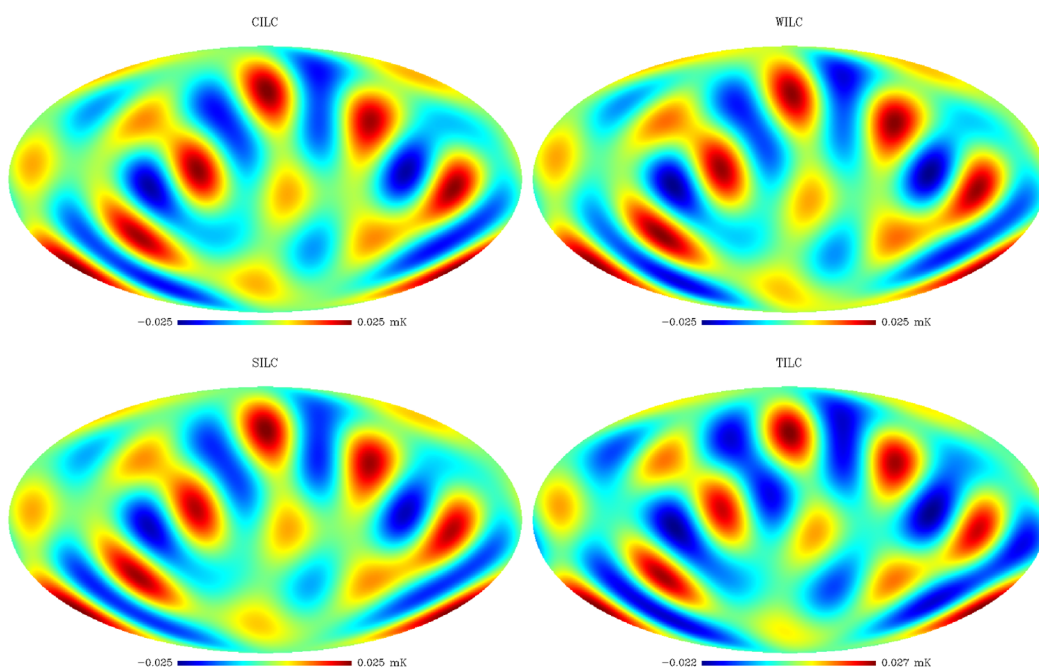


Figura 5.14 - Mapas CILC, WILC, SILC, TILC para $l = 6$

5.3 Função de Correlação Angular e Espectro de Potência

Na Figura 5.15 são mostrados as funções de correlação de dois pontos dos mapas CILC, WILC, SILC, TILC, no céu inteiro, obtidas de acordo com a Equação 1.5. As funções de correlação de dois pontos para o hemisfério Norte e o hemisfério Sul estão nas Figuras 5.16 e 5.17, respectivamente. As funções de correlação angular dos mapas em análise são semelhantes para o céu inteiro. Para o hemisfério Norte e o hemisfério Sul as funções de correlação angular são diferentes para $\alpha > 80^\circ$. Comparando os três gráficos, observa-se uma diferença na amplitude das funções de correlação principalmente entre os hemisférios Norte e Sul.

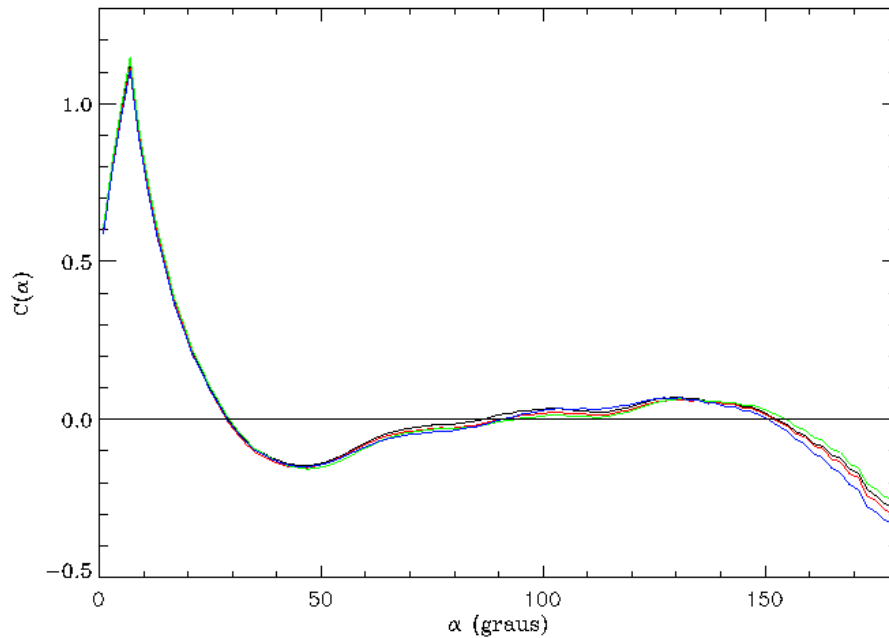


Figura 5.15 - Função de correlação de dois pontos dos mapas CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul) e TCM (verde)

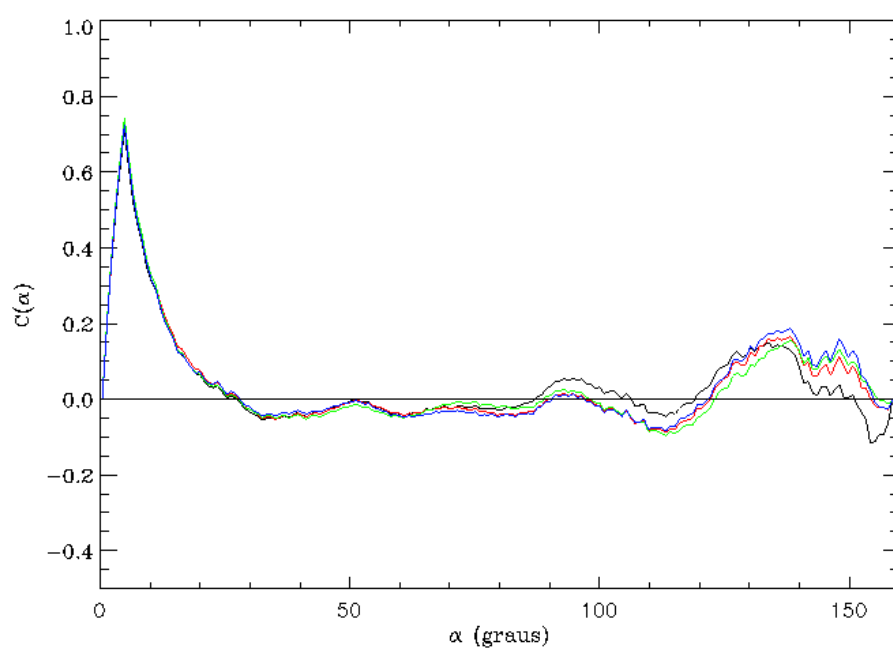


Figura 5.16 - Função de correlação de dois pontos dos mapas CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul), e TCM (verde) para o hemisfério Norte.

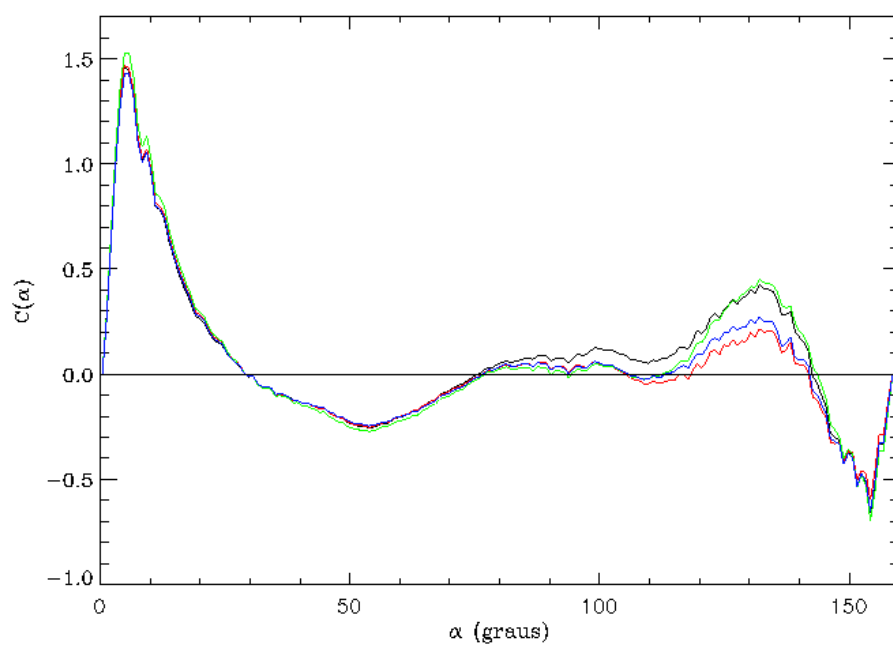


Figura 5.17 - Função de correlação de dois pontos dos mapas CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul), e TCM (verde) para o hemisfério Sul.

A estimativa dos espectros de potência dos mapas CILC, WILC, SILC, TILC foi feita de

acordo com a Equação 1.6, utilizando o programa *Anafast* do HEALPix. Na Figura 5.18 é mostrada a comparação entre os espectros de potência do CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul) e TCM (verde). Nota-se um excelente acordo entre estes espectros de potência em $l \leq 20$.

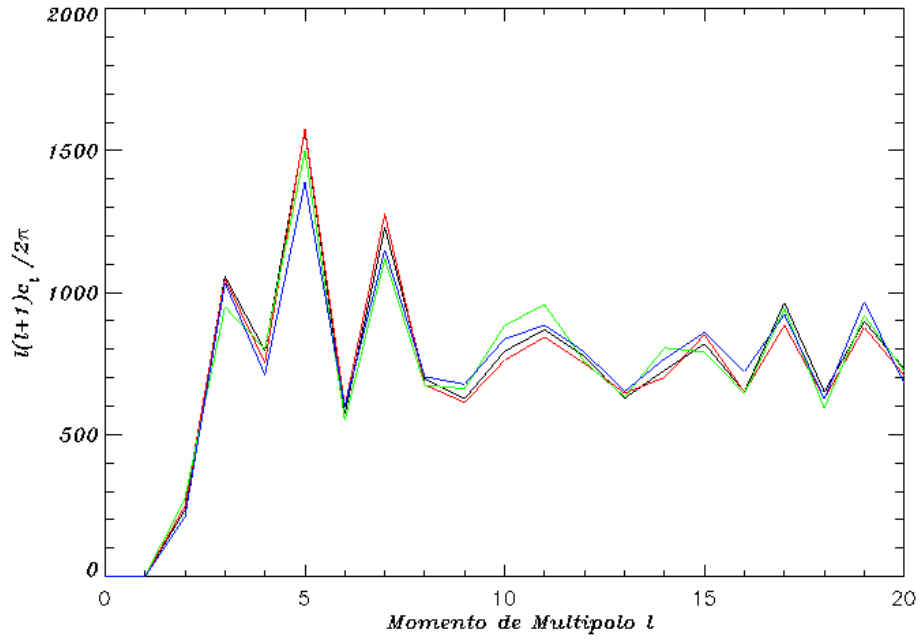


Figura 5.18 - Espectro de potência do CILC (preto), WILC (vermelho), SILC400(azul) e TCM (verde)

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho obtivemos um novo mapa da RCFM com contaminação Galáctica minimizada, principalmente a proveniente da emissão sincrotron. Na descontaminação empregamos o método ILC, com o qual se calculam os coeficientes de minimização baseados em uma estimativa do sinal da RCFM e de cada componente de emissão Galáctica. Para entender o comportamento das componentes de emissão Galáctica utilizamos o MEM, com os dados do GEM na frequência de 2300 MHz, combinados com outros dados disponíveis na literatura. Salientamos que este foi o primeiro trabalho que empregou os dados do GEM para a limpeza dos dados da RCFM.

Observamos que o método ILC depende da resolução angular dos mapas utilizados na análise. Quanto menor a resolução angular dos mapas, mais eficiente é o método. Para obter o mapa CILC, suavizamos todos os mapas utilizados para resolução angular de 2° , pois é esta a resolução do mapa do GEM. Portanto, o mapa CILC possui contaminação Galáctica residual um pouco maior na região do plano Galáctico que os outros mapas descontaminados usando o mesmo método, por exemplo o WILC, o SILC e o TILC, que suavizaram os mapas para a resolução angular de 1° . Esta estimativa da contaminação Galáctica residual no mapa CILC foi feita usando a Equação 4.12, que não é satisfeita em uma pequena região do plano Galáctico. Com esta estimativa é possível corrigir esta região do mapa CILC. Para corrigir este mesmo problema nos mapas WILC, SILC e TILC, seus autores utilizaram-se de simulações monte-carlo.

O mapa CILC possui propriedades semelhantes aos mapas WILC, SILC e TILC fora do plano Galáctico e algumas diferenças no plano Galáctico. O CILC difere em menos de 10% do WILC, do SILC e do TILC, quando analisados fora do plano Galáctico. Na região do plano, a diferença é de cerca de 10% para o WILC e SILC e de 25% para o TILC. Isto mostra que o CILC possui a mesma qualidade dos outros mapas disponíveis. No plano Galáctico, a baixa correlação possivelmente está ligada à utilização de mais um mapa na estimativa do índice espectral da emissão sincrotron, no caso o mapa GEM, o que a princípio aumenta a confiabilidade dessa estimativa.

Nós estudamos as anisotropias dos mapas do tipo ILC em grandes escalas angulares, onde a emissão Galáctica é dominante. Os resultados obtidos para o CILC em grandes escalas angulares estão em boa concordância com os resultados obtidos com os mapas WILC, SILC e TILC. Nós encontramos um baixo valor para a potência do quadrupolo de $\delta T_2^2 = 234,813 \mu K^2$, que está em concordância com os valores reportados em outros estudos, mas é diferente do previsto pelo Modelo Cosmológico Padrão. O mapa CILC possui as mesmas propriedades do quadrupolo e octopolo (amplitude, alinhamento e planaridade)

que também já foram reportadas na literatura ([Tegmark et al., 2003](#); [Eriksen et al., 2004](#); [Park et al., 2007](#)). Também reproduzimos no CILC a propriedade de assimetria Norte-Sul na intensidade da função de correlação angular obtida no WILC. Estes testes mostram que o mapa CILC está apto para aplicações em estudos cosmológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpher, R. A.; Bethe, H.; Gamow, G. The Origin of Chemical Elements. **Physical Review**, v. 73, p. 803–804, 1948. [19](#)
- Bennett, C. L.; Bay, M.; Halpern, M.; Hinshaw, G.; Jackson, C.; Jarosik, N.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S. S.; Page, L.; Spergel, D. N.; Tucker, G. S.; Wilkinson, D. T.; Wollack, E.; Wright, E. L. The Microwave Anisotropy Probe Mission. **The Astrophysical Journal**, v. 583, p. 1–23, jan. 2003. [25](#)
- Bennett, C. L.; Hill, R. S.; Hinshaw, G.; Nolta, M. R.; Odegard, N.; Page, L.; Spergel, D. N.; Weiland, J. L.; Wright, E. L.; Halpern, M.; Jarosik, N.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S. S.; Tucker, G. S.; Wollack, E. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 148, p. 97–117, set. 2003. [15](#), [19](#), [21](#), [26](#), [29](#), [32](#), [33](#), [48](#), [49](#), [51](#)
- Bersanelli, M.; Maino, D.; Mennella, A. Anisotropies of the cosmic microwave background. **Nuovo Cimento Rivista Serie**, v. 25, n. 9, p. 090000–82, set. 2002. [19](#), [23](#), [27](#)
- de Oliveira-Costa, A.; Tegmark, M. CMB multipole measurements in the presence of foregrounds. **Physical Review D**, v. 74, n. 2, p. 023005–+, jul. 2006. [28](#), [48](#), [53](#)
- Dicke, R. H.; Peebles, P. J. E.; Roll, P. G.; Wilkinson, D. T. Cosmic Black-Body Radiation. **The Astrophysical Journal**, v. 142, p. 414–419, 1965. [19](#)
- Dickinson, C.; Davies, R. D.; Davis, R. J. Towards a free-free template for CMB foregrounds. **Monthly Notice of the Royal Astronomical Society**, v. 341, p. 369–384, maio 2003. [35](#)
- Draine, B. T.; Lazarian, A. Diffuse Galactic Emission from Spinning Dust Grains. **The Astrophysical Journal**, v. 494, p. L19+, fev. 1998. [27](#), [37](#)
- Dunkley, J.; Komatsu, E.; Nolta, M. R.; Spergel, D. N.; Larson, D.; Hinshaw, G.; Page, L.; Bennett, C. L.; Gold, B.; Jarosik, N.; Weiland, J. L.; Halpern, M.; Hill, R. S.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S. S.; Tucker, G. S.; Wollack, E.; Wright, E. L. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Likelihoods and Parameters from the WMAP data. **ArXiv e-prints**, v. 803, mar. 2008. [24](#)
- Eriksen, H. K.; Banday, A. J.; Górski, K. M.; Lilje, P. B. On Foreground Removal from the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Data by an Internal Linear Combination

Method: Limitations and Implications. **The Astrophysical Journal**, v. 612, p. 633–646, set. 2004. [19](#), [66](#)

Ferreira, I. S. **Polarização da Radiação Galáctica em 5 GHz : Instrumentação, Medidas e Mapas**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2008. [41](#)

Finkbeiner, D. P. A Full-Sky $H\alpha$ Template for Microwave Foreground Prediction. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 146, p. 407–415, jun. 2003. [15](#), [35](#), [36](#), [46](#)

Finkbeiner, D. P.; Davis, M.; Schlegel, D. J. Extrapolation of Galactic Dust Emission at 100 Microns to Cosmic Microwave Background Radiation Frequencies Using FIRAS. **The Astrophysical Journal**, v. 524, p. 867–886, out. 1999. [15](#), [37](#), [46](#)

Gamow, G. Synthesis of the Primeval Elements. **Physical Review**, v. 70, p. 572–573, 1948. [19](#), [20](#)

Gold, B.; Bennett, C. L.; Hill, R. S.; Hinshaw, G.; Odegard, N.; Page, L.; Spergel, D. N.; Weiland, J. L.; Dunkley, J.; Halpern, M.; Jarosik, N.; Kogut, A.; Komatsu, E.; Larson, D.; Meyer, S. S.; Nolte, M. R.; Wollack, E.; Wright, E. L. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Galactic Foreground Emission. **The Astrophysical Journal**, v. 803, mar. 2008. [15](#), [19](#), [25](#)

Górski, K. M.; et al. Analysis issues for large CMB data sets. In: Banday, A. J.; Sheth, R. K.; da Costa, L. N. (Ed.). **Evolution of Large Scale Structure : From Recombination to Garching**. [S.l.: s.n.], 1999. p. 37–+. [41](#)

Haslam, C. G. T.; Cooke, D. J.; Day, G. A.; Wilson, W. E.; Graham, D. A.; Wielebinski, R.; Cleary, M. N. The Parkes 408 MHz southern survey. **Proceedings of the Astronomical Society of Australia**, v. 2, p. 331–334, out. 1975. [32](#)

Haslam, C. G. T.; Klein, U.; Salter, C. J.; Stoffel, H.; Wilson, W. E.; Cleary, M. N.; Cooke, D. J.; Thomasson, P. A 408 MHz all-sky continuum survey. I - Observations at southern declinations and for the North Polar region. **Astronomy and Astrophysics**, v. 100, p. 209–219, jul. 1981. [32](#)

Haslam, C. G. T.; Quigley, M. J. S.; Salter, C. J. A 408 MHz survey of the galactic anticentre region. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 147, p. 405–+, 1970. [32](#)

Haslam, C. G. T.; Salter, C. J.; Stoffel, H.; Wilson, W. E. A 408 MHz all-sky continuum survey. II - The atlas of contour maps. **Astronomy and Astrophysics**, v. 47, p. 1–+, jan. 1982. [15](#), [32](#), [33](#), [34](#), [45](#), [46](#)

Haslam, C. G. T.; Wilson, W. E.; Graham, D. A.; Hunt, G. C. A further 408 MHz survey of the northern sky. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 13, p. 359–+, mar. 1974. [32](#)

Hauser, M. G.; Arendt, R. G.; Kelsall, T.; Dwek, E.; Odegard, N.; Weiland, J. L.; Freudenreich, H. T.; Reach, W. T.; Silverberg, R. F.; Moseley, S. H.; Pei, Y. C.; Lubin, P.; Mather, J. C.; Shafer, R. A.; Smoot, G. F.; Weiss, R.; Wilkinson, D. T.; Wright, E. L. The COBE Diffuse Infrared Background Experiment Search for the Cosmic Infrared Background. I. Limits and Detections. **The Astrophysical Journal**, v. 508, p. 25–43, nov. 1998. [23](#)

Hinshaw, G.; Nolta, M. R.; Bennett, C. L.; Bean, R.; Doré, O.; Greason, M. R.; Halpern, M.; Hill, R. S.; Jarosik, N.; Kogut, A.; Komatsu, E.; Limon, M.; Odegard, N.; Meyer, S. S.; Page, L.; Peiris, H. V.; Spergel, D. N.; Tucker, G. S.; Verde, L.; Weiland, J. L.; Wollack, E.; Wright, E. L. Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature Analysis. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 170, p. 288–334, jun. 2007. [15](#), [19](#), [27](#), [28](#), [29](#), [45](#), [46](#), [48](#), [50](#), [51](#), [53](#)

Hinshaw, G.; Weiland, J. L.; Hill, R. S.; Odegard, N.; Larson, D.; Bennett, C. L.; Dunkley, J.; Gold, B.; Greason, M. R.; Jarosik, N.; Komatsu, E.; Nolta, M. R.; Page, L.; Spergel, D. N.; Wollack, E.; Halpern, M.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S. S.; Tucker, G. S.; Wright, E. L. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Data Processing, Sky Maps, and Basic Results. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 803, mar. 2008. [19](#), [25](#)

Hu, W.; Dodelson, S. Cosmic Microwave Background Anisotropies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 40, p. 171–216, 2002. [15](#), [22](#)

Jones, W. C.; Ade, P. A. R.; Bock, J. J.; Bond, J. R.; Borrill, J.; Boscaleri, A.; Cabella, P.; Contaldi, C. R.; Crill, B. P.; de Bernardis, P.; De Gasperis, G.; de Oliveira-Costa, A.; De Troia, G.; di Stefano, G.; Hivon, E.; Jaffe, A. H.; Kisner, T. S.; Lange, A. E.; MacTavish, C. J.; Masi, S.; Mauskopf, P. D.; Melchiorri, A.; Montroy, T. E.; Natoli, P.; Netterfield, C. B.; Pascale, E.; Piacentini, F.; Pogosyan, D.; Polenta, G.; Prunet, S.; Ricciardi, S.; Romeo, G.; Ruhl, J. E.; Santini, P.; Tegmark, M.; Veneziani, M.; Vittorio, N. A Measurement of the Angular Power Spectrum of the CMB Temperature Anisotropy from the 2003 Flight of BOOMERANG. **The Astrophysical Journal**, v. 647, p. 823–832, ago. 2006. [24](#)

Lachièze-Rey, M.; Gunzig, E. **The Cosmological Background Radiation**. [S.l.]: Computers and Biomedical Research, 1999. [20](#)

Mather, J. C.; Cheng, E. S.; Eplee JR., R. E.; Isaacman, R. B.; Meyer, S. S.; Shafer, R. A.; Weiss, R.; Wright, E. L.; Bennett, C. L.; Boggess, N. W.; Dwek, E.; Gulkis, S.; Hauser, M. G.; Janssen, M.; Kelsall, T.; Lubin, P. M.; Moseley JR., S. H.; Murdock, T. L.; Silverberg, R. F.; Smoot, G. F.; Wilkinson, D. T. A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite. **The Astrophysical Journal**, v. 354, p. L37–L40, maio 1990. [15](#), [23](#)

Mather, J. C.; Fixsen, D. J.; Shafer, R. A.; Mosier, C.; Wilkinson, D. T. Calibrator Design for the COBE Far-Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS). **The Astrophysical Journal**, v. 512, p. 511–520, fev. 1999. [19](#), [21](#)

Mezger, P. G.; Henderson, A. P. Galactic H II Regions. I. Observations of Their Continuum Radiation at the Frequency 5 GHz. **The Astrophysical Journal**, v. 147, p. 471–+, fev. 1967. [35](#)

Oster, L. Free-Free Emission in the Radio-Frequency Range. **The Astrophysical Journal**, v. 66, p. 50–+, mar. 1961. [34](#)

Park, C.-G.; Park, C.; Gott, J. R. I. Cleaned 3 Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Cosmic Microwave Background Map: Magnitude of the Quadrupole and Alignment of Large-Scale Modes. **The Astrophysical Journal**, v. 660, p. 959–975, maio 2007. [19](#), [28](#), [48](#), [53](#), [66](#)

Penzias, A. A.; Wilson, R. W. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. **The Astrophysical Journal**, v. 142, p. 419–421, jul. 1965. [19](#)

Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P. **Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing**. [S.l.]: Cambridge: University Press, |c1992, 2nd ed., 1992. 785-817 p. [43](#)

Readhead, A. C. S.; Myers, S. T.; Pearson, T. J.; Sievers, J. L.; Mason, B. S.; Contaldi, C. R.; Bond, J. R.; Bustos, R.; Altamirano, P.; Achermann, C.; Bronfman, L.; Carlstrom, J. E.; Cartwright, J. K.; Casassus, S.; Dickinson, C.; Holzapfel, W. L.; Kovac, J. M.; Leitch, E. M.; May, J.; Padin, S.; Pogosyan, D.; Pospieszalski, M.; Pryke, C.; Reeves, R.; Shepherd, M. C.; Torres, S. Polarization Observations with the Cosmic Background Imager. **Science**, v. 306, p. 836–844, out. 2004. [24](#)

Reich, P.; Reich, W. A radio continuum survey of the northern sky at 1420 MHz. II. **Astronomy and Astrophysics**, v. 63, p. 205–288, fev. 1986. [32](#)

Reich, P.; Testori, J. C.; Reich, W. 1420MHz radio continuum survey of the southern sky (Reich+, 2001). **VizieR Online Data Catalog**, v. 337, set. 2001. [32](#)

_____. A radio continuum survey of the southern sky at 1420 MHz. The atlas of contour maps. **Astronomy and Astrophysics**, v. 376, p. 861–877, set. 2001. [32](#)

Reich, W. A radio continuum survey of the northern sky at 1420 MHz. I. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 48, p. 219–297, maio 1982. [32](#)

Reichardt, C. L.; Ade, P. A. R.; Bock, J. J.; Bond, J. R.; Brevik, J. A.; Contaldi, C. R.; Daub, M. D.; Dempsey, J. T.; Goldstein, J. H.; Holzapfel, W. L.; Kuo, C. L.; Lange, A. E.; Lueker, M.; Newcomb, M.; Peterson, J. B.; Ruhl, J.; Runyan, M. C.; Staniszewski, Z. High resolution CMB power spectrum from the complete ACBAR data set. **ArXiv e-prints**, v. 801, jan. 2008. [24](#)

Rodrigues, R. **Um Experimento para Medir o Brilho Total do Céu em Comprimentos de Onda Centimétricos**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2000. [41](#)

Rybicki, G.; Lightman, A. **Radiative processes in astrophysics**. [S.l.]: New York, Wiley-Interscience, 1979. 393 p., 1979. [34](#)

Schlegel, D. J.; Finkbeiner, D. P.; Davis, M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. **The Astrophysical Journal**, v. 500, p. 525–+, jun. 1998. [27](#), [37](#)

Smoot, G.; Bennett, C.; Weber, R.; Maruschak, J.; Ratliff, R.; Janssen, M.; Chitwood, J.; Hilliard, L.; Lecha, M.; Mills, R.; Patschke, R.; Richards, C.; Backus, C.; Mather, J.; Hauser, M.; Weiss, R.; Wilkinson, D.; Gulkis, S.; Boggess, N.; Cheng, E.; Kelsall, T.; Lubin, P.; Meyer, S.; Moseley, H.; Murdock, T.; Shafer, R.; Silverberg, R.; Wright, E. COBE Differential Microwave Radiometers - Instrument design and implementation. **The Astrophysical Journal**, v. 360, p. 685–695, set. 1990. [19](#), [23](#)

Smoot, G. F.; Gorenstein, M. V.; Muller, R. A. Detection of anisotropy in the cosmic blackbody radiation. **Physical Review Letters**, v. 39, p. 898–901, out. 1977. [21](#)

Spergel, D. N.; Bean, R.; Doré, O.; Nolta, M. R.; Bennett, C. L.; Dunkley, J.; Hinshaw, G.; Jarosik, N.; Komatsu, E.; Page, L.; Peiris, H. V.; Verde, L.; Halpern, M.; Hill, R. S.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S. S.; Odegard, N.; Tucker, G. S.; Weiland, J. L.; Wollack, E.; Wright, E. L. Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 170, p. 377–408, jun. 2007. [19](#), [25](#), [58](#)

Spiegel, D. N.; Verde, L.; Peiris, H. V.; Komatsu, E.; Nolte, M. R.; Bennett, C. L.; Halpern, M.; Hinshaw, G.; Jarosik, N.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S. S.; Page, L.; Tucker, G. S.; Weiland, J. L.; Wollack, E.; Wright, E. L. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters. **The Astrophysical Journal**, v. 148, p. 175–194, set. 2003. [19](#), [25](#)

Tegmark, M.; de Oliveira-Costa, A.; Hamilton, A. J. High resolution foreground cleaned CMB map from WMAP. **Physical Review D**, v. 68, n. 12, p. 651–659, dez. 2003. [19](#), [48](#), [66](#)

Tello, C. **Um Experimento para Medir o Brilho Total do Céu em Comprimentos de Onda Centimétricos**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 1997. [15](#), [28](#), [41](#)

Tello, C.; Villela, T.; Ferreira, I. S.; Smoot, G. The 1465 GHz Continuum Survey of the GEM. **in preparation**, 2008. [41](#)

Tello, C.; Villela, T.; Smoot, G. F.; Torres, S.; Bersanelli, M. A New Radio Continuum Survey of the Sky at 1465 MHz Between Declinations -52 and +68 Degrees. In: Lasenby, A. N.; Wilkinson, A. (Ed.). **New Cosmological Data and the Values of the Fundamental Parameters**. [S.l.: s.n.], 2005. (IAU Symposium, v. 201), p. 138. [41](#)

Tello, C.; Villela, T.; Torres, S.; Bersanelli, M.; Smoot, G. F.; Ferreira, I. S.; Cingoz, A.; Lamb, J.; Barbosa, D.; Perez-Becker, D.; Ricciardi, S.; Currivan, J. A.; Platania, P.; Maino, D. The 2.3 GHz continuum survey of the GEM project. **ArXiv**, v. 712, dez. 2007. [15](#), [29](#), [40](#), [41](#), [42](#), [45](#)

Torres, S. **Comunicação Pessoal**. [S.l.], 1995. [41](#)

Torres, S.; Cañon, V.; Casas, R.; Umaña, A.; Tello, C.; Villela, T.; Bersanelli, M.; Bensadoun, M.; de Amici, G.; Limon, M.; Smoot, G.; Witebsky, C. The GEM project: An international collaboration to survey galactic radiation emission. **Astrophysics and Space Science**, v. 240, p. 225–234, set. 1996. [41](#)

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.