

LUCIANA GUIDON COELHO

NOVOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE RUÍDO DE FUNDO DE CÉU
APLICADOS À MISSÃO COROT

São Paulo

2012

LUCIANA GUIDON COELHO

NOVOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE RUÍDO DE FUNDO DE CÉU
APLICADOS À MISSÃO COROT

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica

São Paulo

2012

LUCIANA GUIDON COELHO

NOVOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE RUÍDO DE FUNDO DE CÉU
APLICADOS À MISSÃO COROT

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas
Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Hae Yong Kim

São Paulo

2012

À Tati e Runa.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Hae Yong Kim pela ajuda, pela paciência, por todos os comentários construtivos e orientações.

Agradeço especialmente ao colega Dr. Fábio de Oliveira Fialho cuja ajuda imensurável, dedicação e paciência foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Vanderlei Cunha Parro, pela ajuda e incentivo para que eu ingressasse no mestrado.

Ao Prof. Dr. Eduardo Victor dos Santos Pouzada, ao Prof. Livre-Docente Jorge Mieczyslaw Janiszewski e ao Prof. Ms. Gilberto Eiti Murakami pelo incentivo para que eu ingressasse no mestrado.

Agradeço ao meu namorado Fábio Eduardo Roque pelas inúmeras sugestões, pela ajuda e pela compreensão.

À minha amiga Camila Ozório pelo apoio e pela amizade, e obrigada à amiga Ilka Antônia Rios por todo o incentivo.

Aos amigos uspianos Carolina Krebs Kleingesinds, Diego Paolo Ferruzzo Correa e Cristiane Batistela por todos os momentos agradáveis, pela ajuda e pela companhia.

Agradeço também aos meus familiares e demais amigos e colegas que não especifiquei aqui e que nem por isso foram menos importantes para a concretização deste trabalho.

“Não devemos admitir mais causas para
as coisas naturais do que as que são
verdadeiras e suficientes para explicar
suas aparências”

(Isaac Newton)

RESUMO

O satélite franco-europeu com participação brasileira, CoRoT (*Convention, Rotation and planetary Transits*), faz parte de uma missão espacial dedicada à sismologia estelar e à busca por exoplanetas. Para a descoberta de exoplanetas, o objetivo é detectar a ocultação temporária da estrela ao redor da qual orbita o planeta em questão, ou seja, detectar um trânsito planetário que pode ser traduzido por uma diminuição tênue do fluxo de fótons estelar coletado pelos CCDs do fotômetro. Existem alguns ruídos e diversas fontes de luz que atingem os CCDs e que não são provenientes das estrelas em estudo. Tais ruídos e fontes de luz geram uma iluminação chamada de “fundo de céu” nos CCDs que é não homogênea e que precisa ser corrigida antes do início da exploração científica dos dados obtidos nas observações do satélite. A correção de fundo de céu é um procedimento padrão na redução de dados fotométricos, e consiste na subtração do nível médio de fundo de céu das medições fotométricas de uma estrela. Para a determinação do fundo de céu o CoRoT utiliza um conjunto de janelas de fundo de céu. Este trabalho propõem métodos alternativos para a alocação destas janelas de fundo de céu e estimação do ruído de fundo de céu para o canal de exoplanetas do satélite CoRoT. São apresentados dois novos métodos de alocação de janelas e são testados diversos métodos de estimação de ruído de fundo de céu. Os testes realizados neste trabalho sugerem fortemente a utilização do método chamado *k-min* para a alocação de janelas e do método “mediana e 5 vizinhos” para a estimação de ruído de fundo de céu. O método *k-min* procura alocar as janelas de maneira homogênea e em locais de mínimo de uma imagem do céu observado pelo satélite e o método “mediana e 5 vizinhos” estima o ruído de fundo de céu a partir da mediana de todas as janelas de fundo de céu com nível DC corrigido pela mediana das cinco janelas vizinhas mais próximas.

Palavras-chaves: CoRoT. Janelas de fundo de céu. Processamento de imagens.

ABSTRACT

The French-European satellite with Brazilian participation, CoRoT (Convention, Rotation and planetary Transits), is part of a space mission dedicated to stellar seismology and exoplanets search. Both scientific programs are based on a high-precision photometry and require long-term uninterrupted observations. The satellite uses stellar photometry from images captured on CCD (charged coupled devices), known as photometry by mask. For the discovery of exoplanets, the goal is to detect the temporary hiding of the star which around orbits the planet in question, that is, to detect a planetary transit, which can be translated by a slight decrease in the stellar photon flux collected by the CCDs of the photometer. There are some noise and various sources of light that reaches the CCD and are not from the stars under study. Such noise and light sources produce a light called "sky background" in CCDs that is not homogeneous and that must be corrected before the scientific exploration of the data obtained from satellite observations. The sky background correction is a standard procedure in the reduction of photometric data. It consists in subtracting the average level of sky background of photometric measurements of a star. To determine the sky background noise, CoRoT uses a set of sky background windows and this work proposes alternative methods for allocating these windows and for estimating the sky background noise to the CoRoT exoplanet channel. Here are present two new methods of windows allocation and are tested several methods of estimating the sky background noise. Tests conducted in this study strongly suggest the use of the method called *k-min* for windows allocation and the method "median and 5 neighbors" to the estimation of sky background noise. The *k-min* method tries to allocate windows homogeneously and in minimum locals of image of the sky observed by the satellite, and the method "median and 5 neighbors" estimates the sky background noise by the median of all background windows with DC level corrected by the median of the five nearest neighbors.

Keywords: CoRoT. Sky background windows. Image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concepção artística (CNES)	19
Figura 2 - Logo da missão: "Das estrelas aos planetas habitáveis" (CNES).....	20
Figura 3 - Estrutura estelar (CNES)	22
Figura 4 - Identificação de planeta através da técnica da velocidade radial (NASA)	23
Figura 5 - Efeito do trânsito planetário na curva de luz de uma estrela (CNES)	23
Figura 6 - Posicionamento do satélite em relação ao Sol e a Terra (CNES).....	26
Figura 7 - Orientação do satélite - órbita inercial polar (CNES).....	27
Figura 8 - Preparação do satélite CoRoT (Thales Alenia Space/JL Bazile 2006)	27
Figura 9 - Telescópio (CNES)	28
Figura 10 - Câmera (CNES).....	28
Figura 11 - Compartimento de equipamentos (CNES).....	29
Figura 12 - Fotometria por abertura (ou máscara) e a máscara. Em cada linha a imagem da esquerda trata-se do céu ao redor do alvo em observação, a imagem central é a máscara e a imagem da direita é a diferença entre as duas primeiras (BAGLIN <i>et al.</i> , 2008)	34
Figura 13 - Anomalia do Atlântico Sul sentida pelo CoRoT (PINHEIRO DA SILVA, 2007)	36
Figura 14 – Simulação da passagem do CoRoT sobre a superfície da Terra, ao longo de um período de 24 horas, nota-se a passagem pela AMAS (Terrametrics / Google Earth. Script de rastreio de satélites. Robert Simpson, Cardiff University) ...	37
Figura 15 - CCDs E2V Technologies série 4280 (CNES)	38
Figura 16 - As zonas do CCD e suas denominações.....	38
Figura 17 - Ilustração do funcionamento do CCD com indicação dos pixels de <i>prescan</i> e <i>overscan</i> (DRUMMOND, 2007)	42
Figura 18 - Padrão de perturbação em uma subimagem de 150x150 pixels do canal de exoplanetas (AUVERGNE <i>et al.</i> , 2009).....	43
Figura 19 - (a) Distribuição das janelas de fundo de céu na corrida IRa01. As janelas amostradas a 512 segundos são representadas por cruces e as amostradas a 32 segundos por losangos (DRUMMOND <i>et al.</i> , 2008). O CCD foi dividido em 4 regiões apenas, o que resultou em uma alocação de janelas não homogênea. (b)	

Distribuição das janelas na corrida LRc01. O CCD foi dividido em 49 regiões, o que resultou uma distribuição mais homogênea das janelas	47
Figura 20 - Estrelas e as janelas de fundo de céu espacialmente mais próximas delas.....	48
Figura 21 - Interpolação e extrapolação triangular (SAMADI <i>et al.</i> , 2006)	49
Figura 22 - Imagem completa do fundo de céu	55
Figura 23 - Imagem completa com correção de brilho e contraste.....	55
Figura 24 - Detalhes da Figura 23. (a) Estrela saturada. (b) <i>Smearing</i> , efeito gerado na transferência das linhas da zona de imagem para zona de memória no CCDs. (c) Passagem de algum objeto na baixa órbita terrestre (provavelmente lixo espacial) .	56
Figura 25 - Detalhe da imagem completa do céu.....	56
Figura 26 - Uma região da imagem completa com janelas de fundo de céu de 32s em verde, janelas de fundo de céu de 512s em azul e estrelas alvos em vermelho.	57
Figura 27 - <i>Bounding box</i> (ou simplesmente <i>box</i>) de uma janela (em vermelho) com as estrelas mais próximas dela	60
Figura 28 - A melhor solução obtida pelo algoritmo aleatório no teste 1	61
Figura 29 - A melhor solução obtida pelo algoritmo <i>k</i> -médias no teste 1	62
Figura 30 - A melhor solução obtida pelo algoritmo <i>k</i> -box no teste 1	62
Figura 31 - Solução do <i>k</i> -box utilizando os dados do CoRoT, da corrida LRc01	63
Figura 32 - Imagem máscara, onde os quadrados representam as possíveis posições para alocação de janela. A orientação desta figura não é a mesma das seguintes.....	65
Figura 33 - Imagem completa do CCD1, antes da corrida LRc01, na qual serão alocadas as janelas de fundo de céu	66
Figura 34 - Alocação de 200 janelas pelo método <i>k</i> -min. (a) 200 janelas alocadas com <i>dmin</i> = 50. (b) 200 janelas alocadas com <i>dmin</i> = 80. (c) 200 janelas alocadas com <i>dmin</i> = 120. (d) Não foi possível alocar as 200 janelas, apenas 83 foram alocadas com <i>dmin</i> = 200.....	68
Figura 35 – (a) Alocação de janelas pelo método <i>k</i> -min. Foram alocadas 49 janelas (como no CCD1 da corrida LRc01 para janelas de 32s) com <i>dmin</i> de 250 pixels. (b) Pedaco da imagem completa com algumas janelas alocadas pelo <i>k</i> -min.....	70
Figura 36 – (a) Alocação de janelas pelo método <i>k</i> -min. Foram alocadas 146 janelas (como no CCD1 da corrida LRc01 para janelas de 512s) com <i>dmin</i> de 120 pixels. (b) Pedaco da imagem completa com algumas janelas alocadas pelo <i>k</i> -min	71

Figura 37 - Interpolação <i>Nearest Neighbor</i> do Matlab.....	76
Figura 38 - Janelas de 32s CCD1 IRa01 representadas como imagem	77
Figura 39 - Detalhamento do comportamento das séries temporais	77
Figura 40 - Primeiras 100 amostras de janela de 32s do CCD1(LRC01) (dados N1, com correções) onde se enfatiza a passagem pela AMAS, efeitos de <i>outliers</i> e a passagem pela zona iluminada pelo Sol e pela não iluminada	78
Figura 41 - Janelas de 512s CCD1 IRa01 representadas como imagem	79
Figura 42 - Detalhamento do comportamento das séries temporais	79
Figura 43 - Estimação da linha desconhecida pela mediana das demais séries temporais em dado instante de tempo. As linhas representam as janelas, ou seja, cada uma das séries temporais, e as colunas representam os valores de elétrons/pixel lidos em cada instante de tempo	82
Figura 44 - Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos. Na figura está ilustrada a estimação da linha desconhecida a partir da média dos dois vizinhos espacialmente mais próximos, indicados pelo retângulo verde, da janela referente à linha desconhecida.....	83
Figura 45 - Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos espaciais e temporais. Na figura está ilustrada a estimação da linha desconhecida a partir da média dos dois vizinhos espacialmente mais próximos da janela referente à linha desconhecida, considerando-se para o cálculo apenas uma quantidade ν de vizinhos temporais, como indicado pelo retângulo verde.....	85
Figura 46 - Pixels lidos na janela e ordenados.....	87
Figura 47 - Estimação da linha desconhecida pela imagem completa. O valor de elétrons/pixel obtido na janela indicada pelo retângulo azul será utilizado para estimar a linha desconhecida	89
Figura 48 - Estimação da linha desconhecida pelas vizinhas mais próximas, seguida de correção de média pela imagem completa.....	90
Figura 49 - Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas seguida da correção de média da linha pela média das medianas das k janelas mais próximas	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - O custo da solução (a maior distância entre uma estrela e a janela mais próxima, em <i>pixels</i>) encontrada pelos três algoritmos	61
Tabela 2 - Medidas na imagem completa, referentes às janelas do CCD1	69
Tabela 3 - Descrição das séries temporais utilizadas neste trabalho	74
Tabela 4 - Descrição das imagens completas utilizadas neste trabalho	74
Tabela 5 - Desvio padrão	80
Tabela 6 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas	82
Tabela 7 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela média das janelas	83
Tabela 8 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela janela vizinha mais próxima	84
Tabela 9 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pelas cinco janelas vizinhas mais próximas.....	84
Tabela 10 – Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pelos 5 vizinhos mais próximos e 3 temporais.....	85
Tabela 11 - Estimação de fundo de céu nas estrelas pelo método <i>estrela-box</i> , <i>estrela-box</i> – 75 <i>pixels</i> e média das janelas de fundo de céu	87
Tabela 12 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela imagem completa	89
Tabela 13 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pelas vizinhas mais próximas e correção de média pela imagem completa.....	91
Tabela 14 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela média das janelas e correção de média pela imagem completa	91
Tabela 15 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas e correção de média pela imagem completa	92
Tabela 16 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela mediana e 5 vizinhos.....	93
Tabela 17 - Resumo dos resultados para LRc01, 32s	94
Tabela 18 - Resumo dos resultados para LRc01, 512s	94

Tabela 19 - Resumo dos resultados para LRc01, 32s (apenas as 800 primeiras amostras de cada série temporal)	95
Tabela 20 - Resumo dos resultados para LRc01, 512s (apenas as 800 primeiras amostras de cada série temporal)	95
Tabela 21 - Resumo dos resultados para IRa01, 32s	96
Tabela 22 - Resumo dos resultados para IRa01, 512s	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
AIMO	<i>Advanced Inverted Mode Operation</i>
AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
BCC	<i>Boîtier de Contrôle Caméra</i> , Bloco de Controle da Câmera e dos CCDs
BEP	<i>Boîtier d'Électronique de Proximité</i> , Eletrônica de Proximidade
BEX	<i>Boîtier d'Extraction</i> , Bloco Extrator
CCD	<i>Charged Coupled Devices</i> , Dispositivo de carga acoplada
CNES	<i>Centre National d'Études Spatiales</i> , Centro Nacional de Estudos Espaciais da França
CoRoT	<i>Convention, Rotation and planetary Transits</i>
DFT	<i>Discret Fourier Transform</i> , Transformada Discreta de Fourier
DPU	<i>Digital Process Unit</i> , Unidade de Processamento Digital de Sinais
DWA	<i>Distance-weighted Average</i>
FITS	<i>Flexible Image Transport System</i>
PNR	Pulsações não-radiais
PRNU	<i>Pixel Response Non-Uniformity</i> , Não uniformidade de resposta do pixel
PROTEUS	<i>Plate-forme Reconfigurable pour l'Observation, les Télécommunications et les Usages Scientifiques</i> , Plataforma Reconfigurável para Observação, Telecomunicações e Usos Científicos

PSF	<i>Point-spread Function</i> , Função de Espalhamento do Ponto
RGB	<i>Red Green Blue</i> , Vermelho Verde Azul
RST	<i>Random Telegraph Signal</i> , Sinal Telegráfico Randômico
SAA	<i>South Atlantic Anomaly</i> , Anomalia do Atântico Sul

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO.....	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
1 Introdução	17
2 A missão CoRoT	19
2.1 Sismologia estelar	20
2.2 Busca por exoplanetas.....	22
2.3 O perfil da missão	26
2.4 O instrumento.....	27
2.5 Os dados científicos.....	30
2.6 Participação brasileira	31
2.7 Perturbações oriundas das condições ambientais	32
2.8 Fotometria por máscara fixa.....	33
2.9 Anomalia do Atlântico Sul	35
2.10 CCDs	37
2.10.1 Eficiência quântica e não-uniformidade de resposta de pixel.....	39
2.10.2 Corrente escura.....	39
2.10.3 Pixel brilhante.....	40
2.11 Eletrônica de leitura	41
2.11.1 Offset eletrônico	41
2.11.2 Crosstalk	42
2.11.3 Ruído de leitura	43

3	Janelas de fundo de céu	44
3.1	Descrição das janelas de fundo de céu.....	45
3.2	Atual método de alocação das janelas de fundo de céu	45
3.3	Métodos de estimação de fundo de céu.....	47
3.3.1	Janela vizinha mais próxima.....	48
3.3.2	Interpolação triangular	48
3.3.3	Mediana.....	49
3.3.4	Ajuste polinomial.....	50
3.3.5	DWA	51
3.4	Análise dos métodos	52
4	Métodos de alocação das janelas de fundo de céu	54
4.1	Características das imagens completas de fundo de céu	54
4.2	Método k-box	57
4.2.1	Algoritmo aleatório.....	58
4.2.2	Algoritmo k-médias	58
4.2.3	Algoritmo k-box.....	59
4.2.4	Implementação e testes.....	60
4.2.5	Posições possíveis para janelas k-box.....	64
4.3	Método k-min	65
4.4	Análise dos métodos k-box e k-min na imagem completa	69
4.5	Discussão e conclusão sobre o capítulo	72
5	Métodos de estimação de ruído de fundo e céu	73
5.1	Detalhamento do problema	74
5.2	Características das séries temporais	75
5.3	Métodos de estimação estudados.....	81
5.3.1	Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas no instante t	81

5.3.2	Estimação da linha desconhecida pela média das janelas no instante t	82
5.3.3	Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos mais próximos no instante t	83
5.3.4	Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos mais próximos espacialmente e pelos vizinhos temporais anteriores	84
5.3.5	Método de estimação de ruído de fundo de céu estrela-box	86
5.3.6	Estimação da linha desconhecida pela imagem completa	88
5.3.7	Estimação da linha desconhecida pela média dos τ vizinhos mais próximas seguida da correção de média da janela pela imagem completa	89
5.3.8	Estimação da linha desconhecida pela média das janelas seguida da correção de média da janela pela imagem completa	91
5.3.9	Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas seguida da correção de média da janela pela imagem completa	92
5.3.10	Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas seguida da correção de média da linha pela média das medianas das k janelas mais próximas	92
5.4	Resumos dos resultados dos testes realizados	93
5.5	Discussão sobre o capítulo	97
6	Discussão final	98
6.1	Conclusão	99
6.2	Publicações	99
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE A	104

1 Introdução

O satélite franco-europeu CoRoT (*Convention, Rotation and planetary Transits*) faz parte de uma missão espacial dedicada à sismologia estelar e à busca de exoplanetas (planetas extra-solares). A missão é dirigida pela Agência Espacial Francesa CNES, e conta com a participação de vários países, dentre os quais está o Brasil.

Ambos os programas do satélite, sismologia estelar e busca por exoplanetas, baseiam-se em uma fotometria (medida do fluxo de fótons proveniente de um objeto luminoso) de alta precisão (variações em algumas partes por milhão) e requerem observações ininterruptas de longa duração, que são feitas simultaneamente em regiões adjacentes do céu. A fotometria depende do conhecimento do fundo de céu que é medido através das janelas de fundo de céu.

Para o estudo de sismologia estelar, o satélite precisa ser capaz de medir variações periódicas da ordem de 4×10^{-6} do fluxo de fótons coletados de estrelas de magnitude¹ 6 (sendo ainda mais preciso para magnitudes superiores e menos preciso para magnitudes inferiores). A escala de magnitudes observáveis para o programa de sismologia vai de 5,4 a 9,5. Para a busca de exoplanetas, o intuito é detectar o trânsito planetário, ou seja, a ocultação parcial da estrela hospedeira quando o planeta orbita ao redor dela, que pode ser percebida por meio de uma sutil queda na contagem do fluxo de fótons da estrela em questão. Para tal, são observadas até 6000 estrelas (por CCD, sendo que são dois CCDs dedicados ao canal de exoplanetas) de magnitudes entre 12 e 15,5 e a variação do fluxo de fótons a ser detectada é da ordem de 7×10^{-4} (isto para estrelas de magnitude 15,5 em uma hora de integração).

O objetivo deste trabalho é colaborar com a missão CoRoT e conseqüentemente, com projetos similares, estudando e desenvolvendo uma solução alternativa para o canal de exoplanetas no que tange à alocação de janelas de fundo de céu e a estimação de fundo de céu para a correção das curvas fotométricas dos alvos

¹ A magnitude aparente é um número associado ao brilho que um astro exibe no céu, sendo que as magnitudes aparentes são inversamente proporcionais ao brilho. Ou seja, quanto maior o brilho de um astro, menor é o valor de sua magnitude aparente e vice-versa.

(estrelas) em observação. A motivação para desenvolver este trabalho é que o método em utilização pelo satélite quebra o problema original em subproblemas e toma como a solução do problema original o conjunto de soluções dos subproblemas. Infelizmente, o agrupamento das soluções dos subproblemas nem sempre é uma boa solução do problema original, principalmente, na presença de forte gradiente de fundo de céu. A hipótese inicial era que o método proposto neste trabalho melhoraria a estimação do fundo de céu nas estrelas em observação no canal de exoplanetas por meio de um método diferente de alocação destas janelas e também por meio de um método diferente de estimação do fundo de céu para a correção das curvas fotométricas.

No Capítulo 2 será apresentada uma descrição geral sobre o projeto do satélite CoRoT, descrevendo os programas de sismologia estelar e busca por exoplanetas, apresentando as características físicas do satélite, os dados científicos e uma breve seção sobre a participação brasileira na missão CoRoT.

No Capítulo 3, será detalhada como é atualmente realizada a alocação de janelas de fundo de céu do CoRoT e como é feita a estimação do fundo de céu nas estrelas em observação.

No Capítulo 4, será detalhado o método *k-box* e o método *k-min*, propostos neste trabalho como uma solução alternativa para alocação de janelas e estimação de fundo de céu. Serão apresentados também alguns testes realizados com os métodos e uma discussão sobre os resultados.

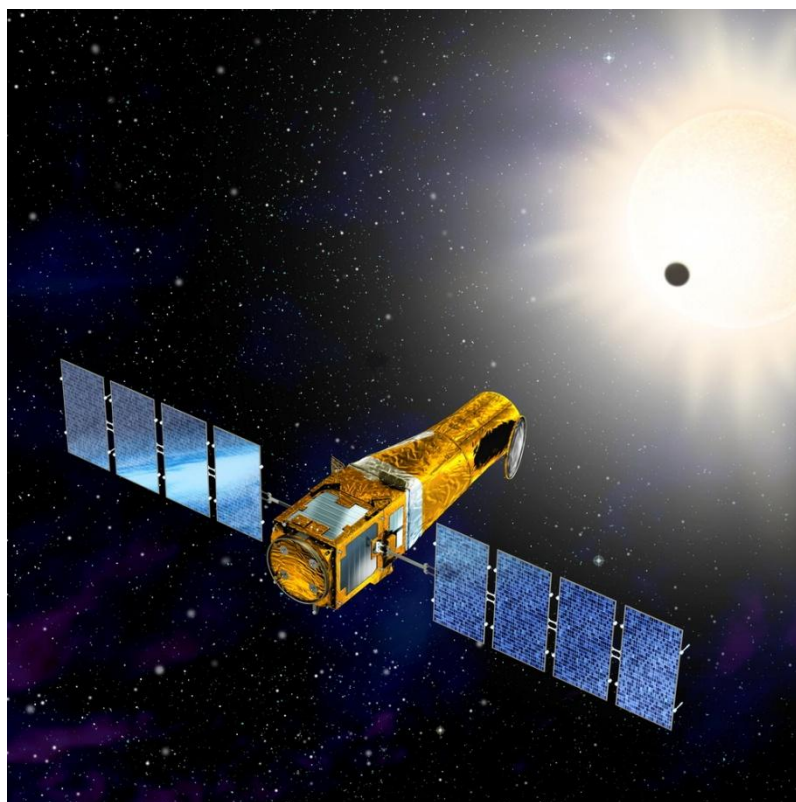
No Capítulo 5, serão apresentados alguns métodos alternativos de estimação de ruído de fundo de céu, assim como alguns testes e discussão sobre os resultados.

Por fim, no Capítulo 6, a discussão final sobre os resultados obtidos.

2 A missão CoRoT

A missão é dirigida pelo CNES em associação com diversos laboratórios franceses e parceiros internacionais como Áustria, Bélgica, Alemanha, Espanha e Brasil.

A missão CoRoT possui dois objetivos científicos distintos, a busca por exoplanetas e o estudo da sismologia estelar. A seguir uma breve introdução sobre ambos os programas, sendo que mais detalhes podem ser encontrados na página oficial da missão CoRoT na internet².



© CNES - Octobre 2005/Illus. D. Ducros

Figura 1 - Concepção artística (CNES)

² Site oficial: <http://smc.cnes.fr/COROT/>



Figura 2 - Logo da missão: "Das estrelas aos planetas habitáveis" (CNES)

2.1 *Sismologia estelar*

Astrosismologia é o estudo da estrutura interna das estrelas, por meio de seus modos de oscilação. Em estrelas, as oscilações podem ser excitadas por turbulências ou por conversões internas de energia térmica em energia cinética de pulsação.

As características de tais oscilações dependem, exclusivamente, da estrutura global da estrela, cujas propriedades físicas podem ser extraídas por inversão de modelos. Neste sentido, a astrosismologia continua sendo a única ferramenta disponível que possibilita a validação de modelos de estruturas internas de estrelas.

O estudo físico das estrelas e de suas atmosferas sofreu avanços consideráveis somente a partir dos anos 30, quando os conhecimentos sobre a estrutura e evolução estelares começaram a progredir significativamente. Contudo, apesar de ser o Sol a estrela mais próxima da Terra, apenas nas últimas duas décadas foi possível estudar com precisão algumas das características físicas de seu interior. Isso ocorreu graças à descoberta de pulsações não radiais (PNR) observadas na fotosfera solar como um rico espectro de oscilações com períodos em torno de 5 minutos. A proximidade dessa estrela permitiu a identificação de quase 10 milhões de modos de PNR em sua superfície. As frequências dessas oscilações são determinadas pela física da cavidade onde elas se propagam (isto é, o interior da

estrela), da mesma maneira que as frequências sonoras estacionárias que se formam no tubo de um instrumento musical dependem das características físicas desse tubo. Através da inversão dos dados (frequências observadas e sua distribuição no espaço de Fourier) podem-se deduzir as propriedades do interior das estrelas.

Os terremotos (ou sismos) terrestres são causados por PNR propagando-se no interior da Terra, e os geofísicos/sismólogos as utilizam para estudar a estrutura de nosso planeta. De maneira semelhante, nas estrelas, as PNR provocam os “estelemotos”, que fornecem informações preciosas e detalhadas sobre a estrutura estelar. A análise sismológica atua como uma espécie de telescópio que permite “enxergar” o interior dos astros³.

Segundo Baglin *et al.* (2006), nas corridas longas (que correspondem ao programa central do satélite), o foco é nos processos hidrodinâmicos internos das estrelas na sequencia principal⁴. O programa estudará em detalhes as variações do fluxo luminoso emitido por um pequeno número de estrelas, de magnitude maior do que 9,5. O período de observação de 150 dias proporciona uma resolução de 0,1 μHz no espaço de Fourier. Essa resolução é necessária para discriminar um número significativo de modos de oscilação, para revelar as divisões de frequência e para reconstruir a curva de perfis.

Por outro lado, nas corridas curtas (que correspondem ao programa exploratório do satélite), o objetivo é observar uma vasta variedade de estrelas, também na sequencia principal, (de tipos espectrais de B à K) de magnitudes até 9,5. Isso será realizado com a inserção de 20 dias de observação entre duas corridas longas do programa central. Com essa pequena janela de tempo, a resolução das frequências cai para 0,6 μHz , mas é suficiente para produzir dados estatísticos sobre a excitação dos modos de oscilação, como função de massa, idade, velocidade de rotação e metalicidade.

Uma descrição bastante detalhada sobre o programa de sismologia estelar do satélite CoRoT é dada por Michel *et al.* (2006).

³ Informações obtidas em: <http://www.astro.iag.usp.br/~corot>

⁴ Principal dos três agrupamentos de um diagrama H-R (Hertzsprung-Russel), onde está a maioria das estrelas, inclusive o Sol. Tal grupo apresenta características marcantes e é neste grupo que as estrelas passam a maior parte de sua vida.

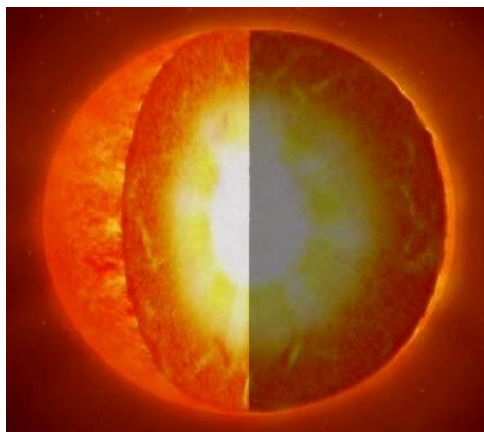


Figura 3 - Estrutura estelar (CNES)

2.2 *Busca por exoplanetas*

Uma técnica bastante conhecida para a detecção de planetas é a medição da velocidade radial das estrelas, realizadas por meio de telescópios em solo. Esta técnica explora o efeito gravitacional de um planeta em órbita da estrela hospedeira: a estrela orbitará ao redor do centro de massa do sistema, apresentando um “bamboleio” em torno dele, como consequência da interação gravitacional com o planeta. A técnica funciona medindo o espectro de uma dada estrela e, quando um planeta gira ao redor dela, sua gravidade faz com que ela se desloque. Tal deslocamento altera a frequência de onda da luz, o que denuncia a presença de um planeta. Esse efeito é particularmente perceptível se o planeta for muito massivo e se encontrar relativamente perto da estrela hospedeira. Devido a este método de detecção, a maioria dos exoplanetas descobertos pertence à família dos jupiterianos quentes (gigantes gasosos) (IGUCHI, 2010). É importante observar que este método fornece uma boa estimativa de massa e órbita do planeta, embora com alguma incerteza, e que não depende tanto de um bom ângulo de observação do sistema com relação à Terra. As primeiras detecções bem sucedidas de planetas por este método foram realizadas por Wolszczan (1994) e Mayor e Queloz (1995), no entanto, planetas rochosos do tipo terrestre (telúricos) continuam inacessíveis empregando-se a tecnologia de medição de velocidade radial estelar.

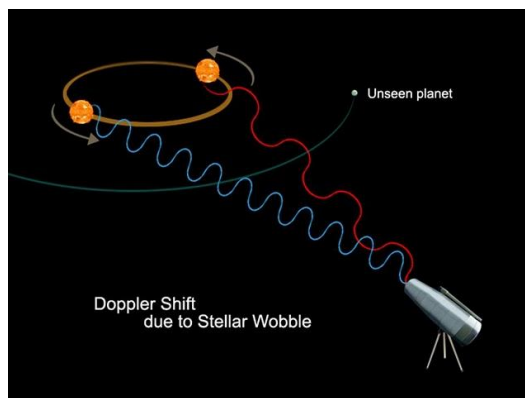


Figura 4 - Identificação de planeta através da técnica da velocidade radial (NASA)

Já o método do trânsito planetário considera que se uma estrela tem um planeta e se, em seu movimento, o planeta se interpõe entre a estrela e o observador, ocorre uma diminuição da quantidade de luz recebida pelo observador. A observação desta diminuição repetidas vezes permite identificar sua causa como sendo o trânsito de um planeta em frente à estrela. A ocorrência do trânsito exige que o sistema tenha uma geometria particular - o plano do movimento do planeta tem que estar sendo visto de perfil. Em compensação, mesmo a diminuição da luz pelo trânsito de um planeta como a Terra pode ser observada⁵.

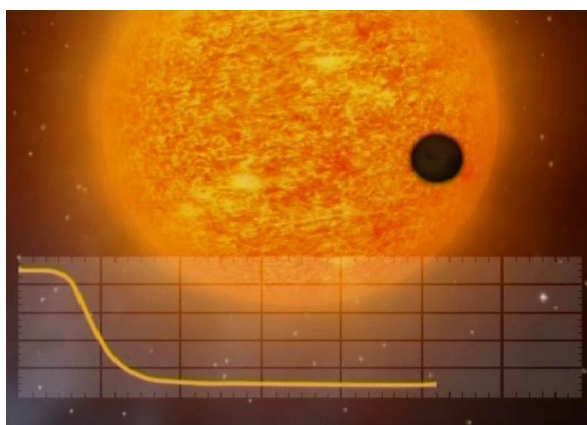


Figura 5 - Efeito do trânsito planetário na curva de luz de uma estrela (CNES)

Como dito anteriormente, a visibilidade do trânsito planetário requer uma posição de observação privilegiada, ou seja, alinhamento ou no máximo apenas uma pequena inclinação da linha de visada em relação ao plano orbital do planeta. Esta técnica

⁵ Informações obtidas em: <http://www.astro.iag.usp.br/~sylvio/exoplanets/planetas.htm>

consiste, basicamente, em observar uma estrela ao longo do tempo e, quando um planeta passa à frente dela, sua luminosidade diminui sutilmente. Medindo-se o grau de redução da luminosidade e a periodicidade é possível detectar o planeta.

O decréscimo de fluxo de fótons durante um trânsito planetário é dado pela expressão a seguir.

$$\Delta F/F = \left(R_{planeta}/R_{estrela} \right)^2,$$

onde $R_{planeta}$ é o raio do planeta e o $R_{estrela}$ é o raio da estrela hospedeira. Para exemplificar, observa-se que o decréscimo de fluxo no caso de um sistema Sol-Júpiter é da ordem de 1%.

Para uma estrela do tipo solar, a probabilidade de ocultação por um planeta de 1 UA⁶, ou seja, detecção de trânsito planetário, é de aproximadamente 0,5%. Portanto, a detecção de exoplanetas por meio do trânsito planetário requer a observação de um grande número de estrelas. Tais observações devem ser feitas por um longo período de tempo para maximizar a probabilidade de observar o fenômeno do trânsito planetário.

No caso do CoRoT, dois CCDs são dedicados ao canal de exoplanetas e um montante de até 12000 alvos são monitorados continuamente durante 150 dias (corridas longas). Uma quantidade adicional de até 12000 alvos também são monitorados durante aproximadamente 20 dias (corridas curtas). Com cinco corridas longas e três ou quatro corridas curtas durante 2,5 anos de duração da missão (previsão inicial de duração da missão), o número total de estrelas alvos seria de: até 60000 para observações de aproximadamente 150 dias e até 40000 para observações de aproximadamente 20 dias (BARGE *et al.*, 2006). As estrelas observadas têm magnitudes entre 12 e 15,5.

Apesar do modesto tamanho do telescópio, era estimada a detecção de várias dezenas de “Júpiteres quentes” e algumas dezenas de planetas do tipo terrestre, isto é, com cerca de 1,5 vezes o raio da Terra (ROUAN, 1998). Vale observar que o

⁶ Unidade astronômica: 1 UA = 1,496 × 10¹¹ m

método da velocidade radial é usado, como teste final, para eliminar falsas detecções (DELEUIL *et al.*, 2006).

Todas as estrelas têm máscaras fotométricas e a luz total sem as máscaras é adquirida pelo tempo de exposição. Tais máscaras cobrem entre 35 e 150 pixels cada. Estrelas brilhantes são amostradas em três cores em função de um prisma de dispersão colocado na frente do CCD.

Para os 12000 alvos o conhecimento da PSF do sistema óptico do canal é necessária para a determinação das máscaras que maximizam a relação sinal-ruído, visando um melhor desempenho do processo de medida fotométrica.

O nível de ruído é especificado é de 700ppm a cada 1 hora de integração, para uma estrela de magnitude 15,5.

O canal de exoplanetas possui um prisma integrado ao sistema óptico visando à decomposição dos sinais luminosos em faixas denominadas por RGB. O que ocorre para estrelas mais brilhantes do que magnitude 14, as medidas fotométricas são especificadas em três cores (azul, verde e vermelho), correspondendo, respectivamente, a pelo menos 30% do total do fluxo de fótons para o azul, pelo menos 40% para o vermelho e o restante para o verde.

Ademais, apenas a detecção de um único trânsito em uma curva de luz não é suficiente para garantir a existência de um planeta, pois padrões similares podem ser gerados por sistemas binários. Para a confirmação da detecção de um planeta, deve-se, em princípio, observar ao menos três trânsitos planetários. Com apenas um ou dois trânsitos detectados, uma análise fotométrica em diferentes cores poderia fornecer alguma informação que distingue sistemas binários de trânsitos planetários. A análise cromática permite então descobrir planetas com longo período orbital, com o mesmo período de observação. Mais detalhes também são descritos por Barge *et al.* (2006).

2.3 O perfil da missão

O satélite está em órbita inercial polar (inclinação de 90°), a 896 km de altitude, o que permite a observação de zonas do céu livres de ofuscações pelo Sol por cerca de 150 dias ininterruptos, constituindo isso um dos grandes trunfos do experimento.

A ascensão reta nominal é de $12,5^\circ$, para observações às 6:50h no inverno e 18:50h no verão. Essas regiões correspondem ao anticentro e ao centro da Galáxia, respectivamente. Durante os seis primeiros meses da missão, o satélite observou estrelas na região celeste em direção ao ponto central da Galáxia. Ao final desse período, o satélite rotacionou 180° , passando a apontar por mais seis meses para o anticentro da Galáxia, repetindo esse procedimento durante a vida útil do satélite⁷.

A inserção do satélite em órbita foi feita por uma nave Soyuz, lançada em 27 de dezembro de 2006, sendo a duração mínima da missão estimada em dois anos e meio. Contudo, suas observações devem continuar para além do ano de 2012 se nenhuma falha grave ocorrer.

Como observado nas figuras a seguir, a observação é realizada na direção equatorial, dentro de um cone de observação de 10° , perpendicular ao plano orbital. O satélite está restrito a rotações de 180° a cada 6 meses, quando o sol está a 90° na linha de visada. Essas manobras permitem duas zonas de observação, cada explorada durante as corridas longas (150 dias) e curtas (20 dias) (PINHEIRO DA SILVA, 2007).

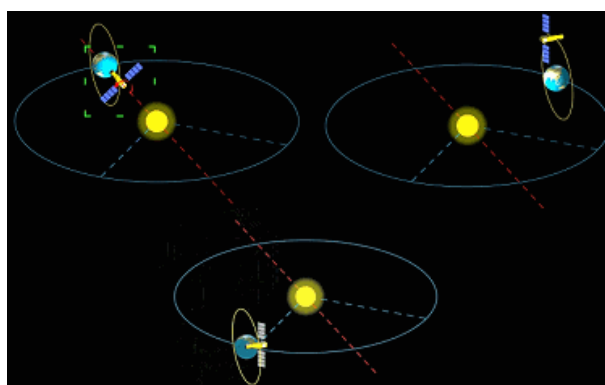


Figura 6 - Posicionamento do satélite em relação ao Sol e a Terra (CNES)

⁷ Informações obtidas no site oficial: <http://smc.cnes.fr/COROT/>

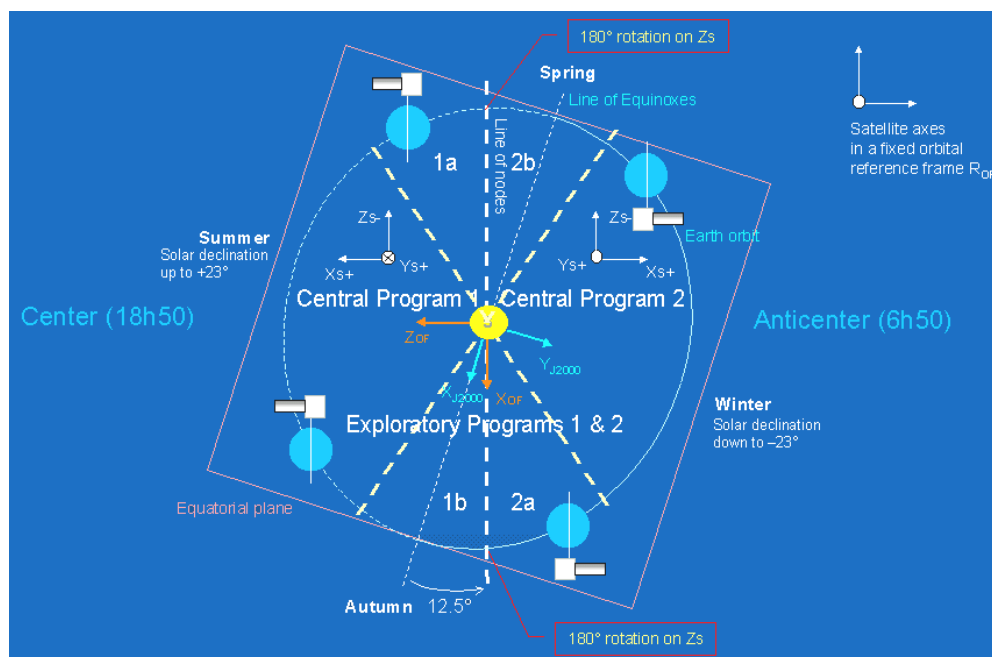


Figura 7 - Orientação do satélite - órbita inercial polar (CNES)

2.4 O instrumento

O satélite CoRoT é um telescópio de quatro metros de comprimento e que pesa 600kg, baseado em uma plataforma PROTEUS projetada para missões em baixa órbita e desenvolvida pelo CNES e Alcatel Space.



Figura 8 - Preparação do satélite CoRoT (Thales Alenia Space/JL Bazile 2006)

O instrumento pode ser dividido em três componentes principais:

1. Um telescópio afocal composto por dois espelhos parabólicos e um defletor (*baffle*) para evitar luz parasita advinda do Sol e albedo terrestre⁸;

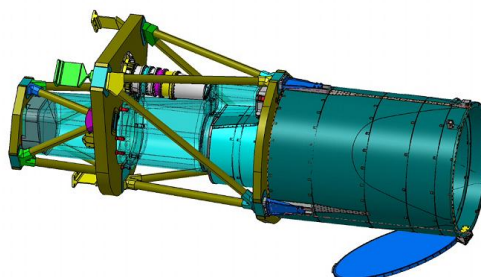


Figura 9 - Telescópio (CNES)

2. Uma câmera de campo aberto composta de uma lente objetiva dióptrica, e um plano focal contendo quatro detectores CCD e um bi-prisma (posicionado diante dos detectores do canal de exoplanetas); e

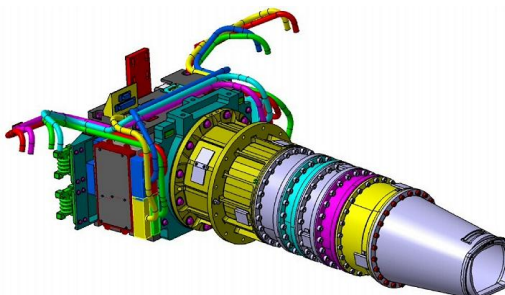


Figura 10 - Câmera (CNES)

3. Um sistema eletrônico de controle térmico e de leitura dos dispositivos CCD, que comporta também as unidades de processamento digital de dados. As informações sobre o instrumento foram obtidas no site oficial da missão, já citado em notas de rodapé anteriores, na seção *CoRoT Payload*, onde podem ser encontradas informações mais detalhadas.

⁸ Explicação detalhada sobre albedo terrestre no Item 5 da Seção 2.7.

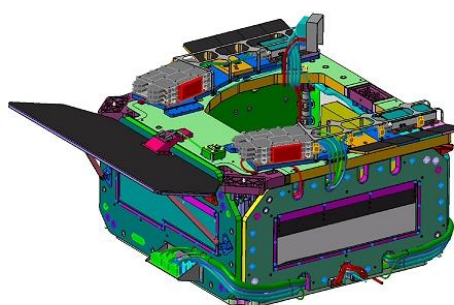


Figura 11 - Compartimento de equipamentos (CNES)

A carga útil do satélite pode ser dividida em um sistema de filtragem óptica, denominado *baffle*, visando minimizar os efeitos de luminosidade provenientes de outras partes que não sejam o campo de investigação; um telescópio; um conjunto de CCDs e um sistema de pré-processamento. A seguir o detalhamento da carga útil, também obtido no site oficial da missão CoRoT.

1. CCDs: são dois para o canal de exoplanetas e dois para o canal de sismologia estelar. Cada CCD possui 2054 linhas por 2160 colunas. Parte das linhas e colunas é mantida em região de obscuridade e usada para determinação de ruído eletrônico resultando em uma área útil de 2048x2048 pixels;
2. Bloco de Eletrônica de proximidade (BEP): responsável pela digitalização da informação analógica proveniente dos CCDs;
3. Bloco de controle da câmera e dos CCDs (BCC): trata-se de uma arquitetura fundamentada em lógica programável responsável pelo controle de varredura dos CCDs;
4. Bloco extrator (BEX): responsável pela organização e filtragem das informações digitais pré-selecionadas pelo BCC e posterior transmissão à unidade de processamento digital de sinais (DPU) em um canal de alta velocidade; e
5. Unidade de processamento digital de sinais (DPU): responsável pelo gerenciamento de parte do fluxo de dados entre o sistema de aquisição e a plataforma PROTEUS.

2.5 Os dados científicos

O satélite CoRoT produz dados que serão divididos em diferentes “níveis”, do “nível” N0 que corresponde aos dados brutos, passando por N1, nível N2 (que compreende as curvas de luz prontas para análise científica) e por fim N3, que compreende dados da análise científica disponíveis para interpretação (Baudin *et al.*, 2006). N0 são os dados recebidos por telemetria, sem tratamento algum. O nível N1 são os dados que receberam correções instrumentais baseadas em modelos desenvolvidos, como *offset* e ganho de eletrônica, porém tais dados não recebem ainda correções chamadas *ad-hoc*. Tais correções são feitas no nível N2, que são os dados que são entregues à comunidade científica⁹. A seguir uma explicação mais detalhada sobre os dados N0, N1, N2 e N3, também segundo Baudin *et al.* (2006):

1. Dados N0: trata-se dos dados brutos. São produzidos no Centro de Missão CoRoT e depois transmitidos ao Centro de Dados CoRoT. Como são dados brutos, não tem utilidade para a comunidade científica;
2. Dado N1: os principais dados a serem gerados pelo satélite são as curvas de luz, tanto no canal de exoplanetas como no de sismologia estelar. Os dados N1 podem ser considerados como aqueles com correções de efeitos instrumentais, porém apenas correções iniciais;
3. Dados N2: são os dados disponíveis para a comunidade científica. Basicamente trata-se de curvas de luz, que devem estar livres de perturbações a fim de permitir aos pesquisadores analisarem as variações fotométricas do alvo; e
4. Dados N3: com o intuito de permitir que qualquer cientista/pesquisador utilize os resultados do CoRoT sem ter que trabalhar com a análise das curvas de luz, foram disponibilizados dados N3, que são, por exemplo, listas de trânsitos planetários detectados pelo canal de exoplanetas.

Dada a grande quantidade de alvos a ser observada simultaneamente, em particular no canal de exoplanetas, o *download* das imagens das estrelas não é possível para

⁹ Correspondência via e-mail sobre o presente trabalho com o Dr. Fábio de Oliveira Fialho, em abril de 2010.

todos os alvos. No modo de observação, decidiu-se fazer medições fotométricas *onboard*.

A avaliação dos sinais fotométricos é baseada na fotometria por abertura. Para cada imagem de estrela, uma abertura (ou máscara) é definida de forma a representar os pixels a serem somados na computação do fluxo de fótons coletado. A máscara é estática para cada alvo e otimamente gerada em solo com base na PSF, para fazer o *upload* antes de cada fase de observação. Uma explicação detalhada sobre as máscaras é dada por Llebaria e Guterman (2006).

2.6 Participação brasileira

A Agência Espacial Brasileira (AEB) aprovou oficialmente a participação brasileira no projeto em setembro de 2002, sendo que a participação foi oficialmente selada com o CNES em maio de 2005.

A contribuição brasileira para a missão CoRoT compreende a operação de uma estação de recepção de dados no Brasil, especificamente em Alcântara, o que possibilitou aumentar em 50% o número de estrelas observadas pelo satélite; a participação de 5 engenheiros e cientistas nas atividades do segmento solo, especificamente no desenvolvimento de *software* de redução de dados, calibração e correção instrumental (JANOT-PACHECO, 2006); e a participação de cientistas brasileiros nos grupos de trabalho para definição, observação e análise preparatória das estrelas que serão observadas na missão¹⁰.

A utilização prática da fotometria por PSF só foi possível graças à participação brasileira no segmento solo da missão, provendo a recepção de dados na base de Alcântara. Devido à sua órbita polar, o satélite tem a oportunidade de sobrevoar a área de recepção de Alcântara diversas vezes ao dia, quando envia, por telemetria, as informações referentes às imagens ainda não processadas das estrelas observadas. As informações enviadas à base brasileira diferem em conteúdo das informações enviadas às demais bases, no Ártico e na Áustria, onde os dados

¹⁰ Informações obtidas em: <http://www.astro.iag.usp.br/~corot>

descarregados correspondem à fotometria por máscara, efetuada a bordo para a redução prévia do volume de informação.

2.7 Perturbações oriundas das condições ambientais

Como o satélite está em uma órbita a 896 km de altitude, o planeta Terra possui certa influência sobre o mesmo e introduz perturbações em função de sua órbita, do dia e das estações do ano (AUVERGNE, 2006). As principais perturbações são as que seguem:

1. Eclipses: a transição entre luz, penumbra e sombra produz variações de temperatura, que por sua vez vibrações nos painéis solares durante o tempo de transição. Além disso, ocorrem flutuações de tensão quando a fonte de alimentação muda dos painéis solares para a bateria;
2. Campo gravitacional e campo magnético da Terra: induzem torques no satélite causando perturbações na movimentação do mesmo;
3. Anomalia do Atlântico Sul: detalhada na Seção 2.9, a seguir;
4. Emissão infravermelha oriunda da Terra e do Sol: ambas produzem variações de temperatura que afetam o bloco focal;
5. Albedo terrestre: quando atinge a Terra a radiação solar é refletida, retrodifundida e absorvida por várias componentes: 6% é retrodifundida para o espaço pelo próprio ar, 20% é refletida pelas nuvens e 4% é refletida pela superfície da Terra. Deste modo, 30% da radiação se perde para o planeta por estes processos que, coletivamente, constituem o albedo¹¹;
6. Objetos na órbita baixa terrestre: como se sabe, o satélite está inserido em uma órbita baixa e, a altitudes entre 400 e 1500 km há outros satélites e detritos maiores do que 10 cm. Quando tais objetos estão no campo de visão do CoRoT, podem produzir uma perturbação global ou local (AUVERGNE *et al.*, 2009).

¹¹ Informações obtidas em: <http://www.iag.usp.br/siae98/meteorologia/radiacao.htm>

Destaca-se também que as caracterizações óptica, térmica, eletrônica e dinâmica completas do comportamento orbital do satélite são de extrema importância para a construção de um modelo que represente fielmente as condições de formação e aquisição de imagens.

No âmbito da dinâmica orbital do telescópio, são levados em conta, para esta modelagem, os efeitos termo-eletrônico transitórios e periódicos causados pela passagem do instrumento da zona de sombras para zonas diretamente expostas à radiação solar e vice-versa. Deve-se levar em conta também o ruído periódico introduzido na formação de imagens devido ao gradiente gravitacional terrestre não-uniforme ao longo da trajetória do satélite.

Outro fator que gera uma componente aleatória na aquisição da imagem é a precisão finita na definição de posicionamento e direcionamento do satélite (*jitter* de atitude) (FIALHO *et al.*, 2007) durante o tempo de integração da imagem, o que gera um “efeito borrão” (*blurring*) na mesma.

2.8 Fotometria por máscara fixa

Fotometria é um ramo da astronomia observacional relacionado com a medição de fluxo luminoso, ou a intensidade luminosa da radiação eletromagnética visível de um objeto astronômico. Quando se utiliza uma câmera CCD para realizar fotometria, há distintas maneiras possíveis de se extrair uma medida fotométrica.

A fotometria por máscara, ou fotometria por abertura, consiste em simplesmente somar as intensidades dos pixels que representam uma estrela. Definem-se ainda, para tal, quais os pixels pertencentes à estrela, ou ainda, aqueles que contêm mais sinal proveniente da estrela do que sinal de ruído ou sinal parasita. Assim, o que se define é uma máscara fotométrica que permite somar somente os pixels da imagem que estão contidos nela.

A máscara pode ser definida simplesmente por um objeto circular cujo raio é definido de modo a não se levar em conta os pixels que estão longe do centro da estrela e que, portanto, não aportam ao cálculo nada além de ruído. Pode-se também definir

uma máscara mais complexa, por maximização da relação sinal-ruído. Para tal, classificam-se os pixels por intensidade decrescente, e observa-se como evolui a relação sinal-ruído em função do número de pixels incluídos dentro da máscara, adicionando-se a cada iteração os pixels de intensidade imediatamente inferior. Esta curva passa por um máximo que define a máscara ótima. É conveniente considerar se para calcular a curva de luz esta máscara deve ser reavaliada a cada ponto ou se ela deve ser determinada somente uma vez. Os limites de uma máscara física se farão sentir quando a imagem borrada da estrela se deslocar, que é o caso de um instrumento espacial para o qual o *jitter* do satélite desloque constantemente a estrela ao longo do CCD. Neste caso, alguns pixels úteis podem sair da máscara e introduzir um ruído importante na fotometria. Se a máscara for recalculada a cada vez, tem-se a vantagem de se seguir a estrela que se desloca no CCD, em contrapartida, a superfície da máscara não será constante. Um pixel que se encontre bem no limiar ora pode ser computado ora não. A solução eleita para o CoRoT, tanto para o canal de exoplanetas como para o de sismologia estelar, é de fazer a fotometria de abertura com uma máscara fixa. As máscaras são definidas no início da observação através do cálculo de maximização da relação sinal-ruído, há um conjunto de 256 modelos pré-definidos de máscaras (BAGLIN *et al.*, 2008).

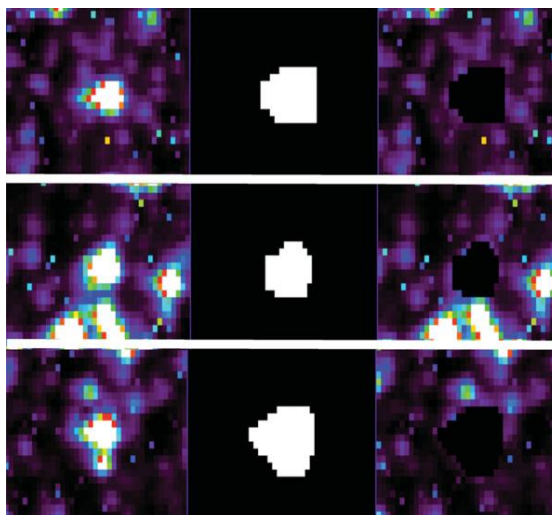


Figura 12 - Fotometria por abertura (ou máscara) e a máscara. Em cada linha a imagem da esquerda trata-se do céu ao redor do alvo em observação, a imagem central é a máscara e a imagem da direita é a diferença entre as duas primeiras (BAGLIN *et al.*, 2008)

2.9 Anomalia do Atlântico Sul

Deve-se também levar em consideração outro fenômeno, apontado por Pinheiro da Silva (2007), já citado neste trabalho, que se deve ao campo magnético terrestre, mais especificamente à Anomalia do Atlântico Sul, também conhecida por SAA (*South Atlantic Anomaly*) ou AMAS (Anomalia Magnética do Atlântico Sul).

De acordo com Saboia e Marques (2011), a AMAS foi descoberta em 1950 e caracteriza-se por ser uma região com baixos valores de intensidade do campo geomagnético da Terra. Seu valor mínimo encontra-se a cerca de 700 km da costa do sudeste brasileiro e, de maneira semelhante às regiões polares, as partículas eletricamente carregadas penetram com maior facilidade na região da AMAS, atingindo camadas mais profundas da atmosfera, tornando essa região uma das mais vulneráveis do planeta aos efeitos das partículas energéticas e radiações. Mapas sistemáticos da configuração da AMAS tem sido obtidos desde 1922, com resultados recentes indicando uma variação anual de seu centro em cerca de $0,25^\circ$ para oeste e de $0,05^\circ$ para norte.

A AMAS é a região onde o cinturão de Van Allen se aproxima mais da superfície da Terra, e sua existência é significativa para satélites e espaçonaves que orbitam a algumas centenas de quilômetros em inclinações entre 35° e 60° , pois estas órbitas levam os satélites à zona de anomalia periodicamente, expondo-os a longos períodos de alta radiação. Apenas para exemplificar, o telescópio Hubble que possui órbita com inclinação de $28,5^\circ$, não realiza observações durante sua passagem pela AMAS (IGUCHI, 2011).

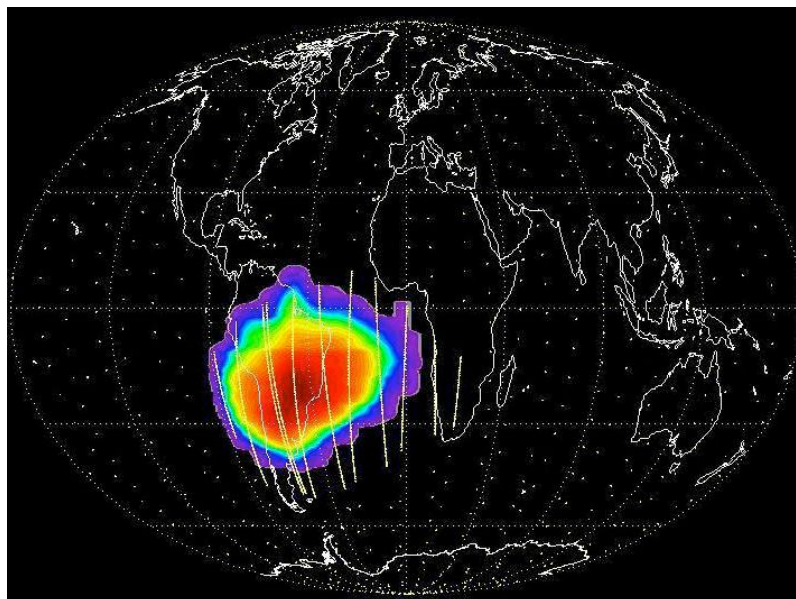


Figura 13 - Anomalia do Atlântico Sul sentida pelo CoRoT (PINHEIRO DA SILVA, 2007)

Segundo Iguchi (2011), a AMAS é a fonte que contribui mais significativamente para a redução do *duty cycle* (ou ciclo de trabalho) do satélite, que é reduzido para aproximadamente 91%. Como o satélite possui período orbital de 103 minutos, chega a realizar até 10 travessias pela região da AMAS por dia, sendo que cada passagem pode durar até 10 minutos, período no qual a captura de imagens é bastante degradada, em virtude da zona de forte radiação e consequente aumento de impactos de partículas ionizadas. A Figura 13 ilustra algumas passagens do satélite sobre a região da AMAS.

Os efeitos da AMAS podem ser esperados nos detectores CCD, na óptica e na eletrônica embarcada. Os efeitos nos CCDs podem ter caráter transiente e aleatório, quando se criam pares elétrons-lacuna durante a passagem de partículas carregadas; ou podem causar danos permanentes, com impactos não ionizantes que deslocam átomos da superfície de aquisição de fótons (BOISNARD; AUVERGNE, 2004) (GRUNEISEN *apud* IGUCHI, 2010). Já a interação entre as partículas de alta energia e as lentes estão limitadas à fluorescência, que leva a uma pequena contribuição para o espalhamento do fluxo luminoso que entra no sistema óptico.

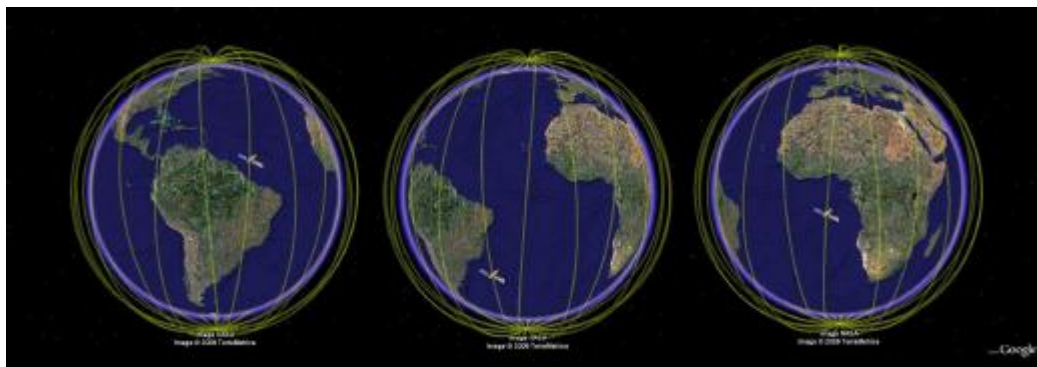


Figura 14 – Simulação da passagem do CoRoT sobre a superfície da Terra, ao longo de um período de 24 horas, nota-se a passagem pela AMAS (Terrametrics / Google Earth. Script de rastreamento de satélites. Robert Simpson, Cardiff University)

2.10 CCDs

O plano focal do satélite CoRoT é composto por quatro CCDs, série 4280 da E2V Technologies, retro-iluminados, de transferência de quadro e estreitos¹². O critério mais relevante para a escolha dos CCDs foram os ruídos referentes a não uniformidade de resposta do pixel, eficiência quântica dos pixels, e à corrente escura (PINHEIRO DA SILVA; LAPAYRERE; BERNARDI, 2006), que serão detalhados nas subseções seguintes. Cada CCD tem 2048x2048 pixels na zona de imagem e 2048x2054 pixels na zona de memória, sendo que cada pixel possui 13,5x13,5 μm de tamanho, o que corresponde a 2,32 segundos de arco. O campo de visão total do satélite abrange cerca de $2,66^\circ \times 3,00^\circ$ no céu. O canal de exoplanetas, no qual este trabalho é focado, utiliza dois CCDs, que serão chamados de E1 e E2.

A transferência de dados da zona de imagem para a zona de memória dura 0,2 segundos. O tempo de exposição real (tempo de integração de fótons) é de 31,8 segundos para o canal de exoplanetas. Sendo assim, a duração de um ciclo (integração e transferência) é de 32 segundos. Em suma, a leitura do CCD é feita a cada 1 segundo para o canal de sismologia estelar e 32 segundos para o canal de exoplanetas, em função dos diferentes requisitos de relação sinal-ruído em cada programa científico. Dada a arquitetura de transferência de quadros, a leitura é

¹² Do inglês: *frame-transfer, thinned and back-illuminated*.

realizada por meio de sucessivas transferências das linhas da imagem para a área de memória e, a área de memória é então lida e digitalizada.

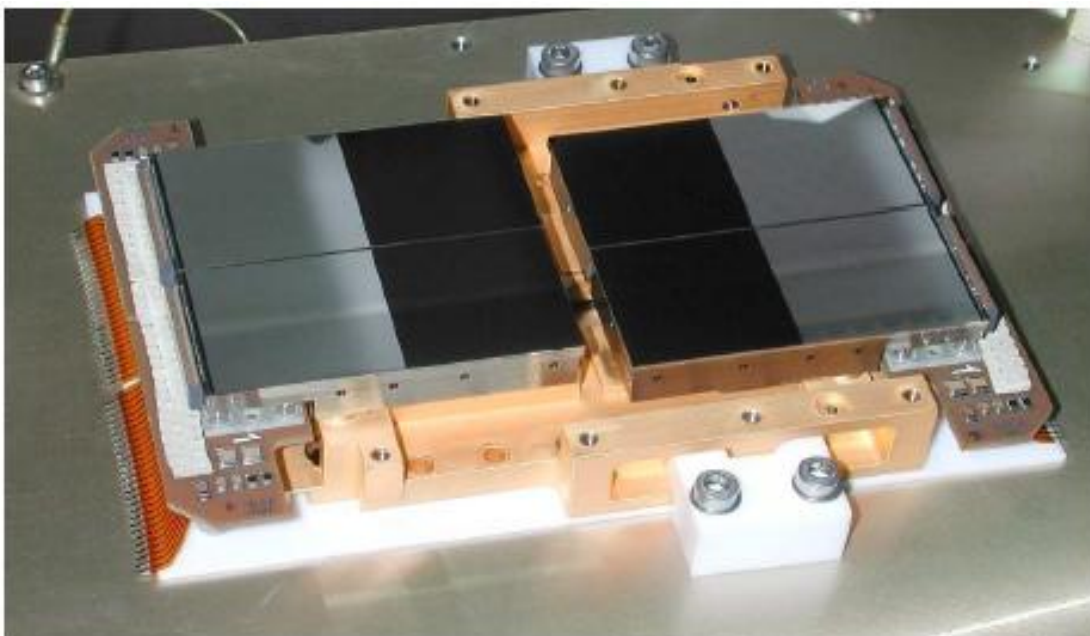


Figura 15 - CCDs E2V Technologies série 4280 (CNES)

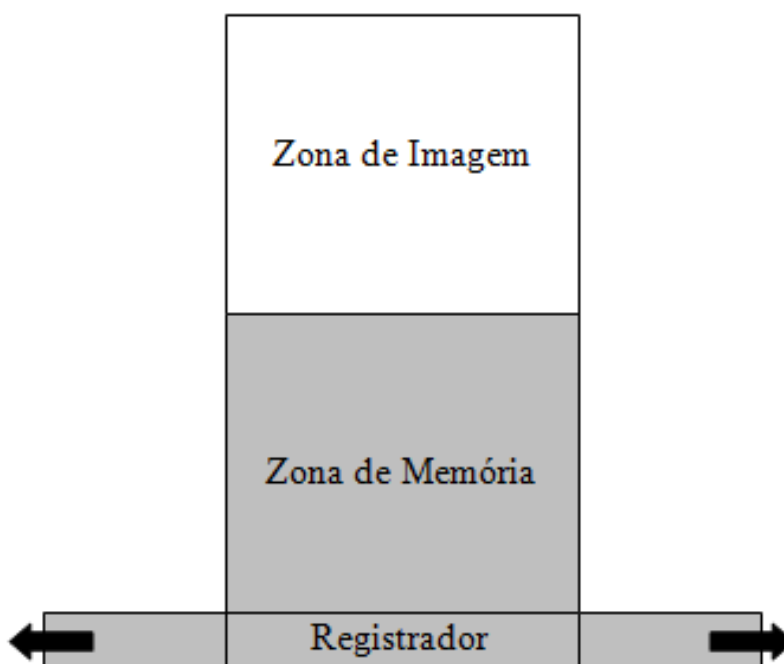


Figura 16 - As zonas do CCD e suas denominações

2.10.1 Eficiência quântica e não-uniformidade de resposta de pixel

Novamente segundo Iguchi (2010), o processo de aquisição de imagens de um CCD se baseia no efeito fotoelétrico característico do silício, ou seja, na produção de pares elétron-lacuna proporcional à incidência de luz no semicondutor. Para que o efeito fotoelétrico ocorra, a energia do fóton incidente deve exceder a diferença entre a banda de valência e a de condução. Sendo que a eficiência quântica é uma medida precisa da sensibilidade à luz de um detector, e é definida como a porcentagem de fótons incidentes na superfície foto reativa que gerarão um par elétron-lacuna. A eficiência quântica de um detector é medida para diferentes intervalos de comprimento de onda, e é fornecida pelo fabricante. Os CCDs que passam por processos de afinamento permitem a iluminação anterior, o que aumenta significativamente a eficiência quântica para luz visível, sendo que neste caso pode chegar a 90%.

Como já citado, a eficiência quântica de um sensor CCD descreve a resposta deste aos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Imperfeições no CCD podem levar a respostas quânticas ligeiramente diferentes para pixels diferentes, o que é normalmente chamado de não uniformidade de resposta do pixel (*pixel response non-uniformity*, PRNU). Essas imperfeições são originalmente geradas na produção do equipamento. Em processamento de imagens, tal não uniformidade é usualmente corrigida com uma imagem produzida na calibração do instrumento. Tal imagem é simplesmente uma imagem do CCD adquirida após iluminação uniforme. Apenas a PRNU local, na vizinhança da imagem da estrela, contribui para o ruído fotométrico que pode ser definido como o desvio padrão relativo sobre um pixel vizinho. Mais detalhes são descritos por Buey *et al.* (2006).

2.10.2 Corrente escura

Durante o tempo de integração, é acumulada uma interferência térmica em cada pixel. O sensor CCD necessita ser refrigerado a uma temperatura bastante baixa

para que este sinal seja reduzido a um nível desprezível. A imagem é deste modo, afetada por uma corrente escura ou *dark current* (cujo nome é derivado do fato desta interferência estar presente mesmo quando o sensor se encontra no escuro).

Ocorre a geração espontânea de elétrons-lacuna nos CCDs, em função da variação de temperatura no silício. O fenômeno ocorre quando uma excitação térmica provê energia suficiente para um elétron da camada de valência pular para a banda de condução. Este elétron pode eventualmente ser adicionado à imagem em integração.

Para reduzir os efeitos da corrente escura, o CCD utilizado habilita o modo de operação chamado *Advanced Inverted Mode Operation* (AIMO). Com esta tecnologia, as fases de condução do CCD são invertidas durante a integração, de modo que o potencial na interface é reduzido a zero.

Os CCDs do CoRoT operam a uma temperatura em torno de -36° C, o que permite estimar uma corrente escura teórica de $\frac{27e^{-}}{\text{pixel}}/\text{seg}$. Informações mais detalhadas são dadas por Gilard *et al.* (2010).

2.10.3 Pixel brilhante

Pixels que apresentam taxas anormais de corrente escura são chamados de pixels brilhantes e normalmente requerem procedimentos especiais em imagens astronômicas para sua identificação e correção. Contribuem com o ruído total e podem introduzir descontinuidades nas curvas de luz no momento de sua criação e durante seu decaimento.

Um pixel quente pode eventualmente desaparecer muitos dias ou até anos após aparecer. Todos os pixels brilhantes existentes no início das atividades do satélite foram identificados. Verificou-se também que a corrente escura tem efeito mais acentuado no canal de exoplanetas, em função do maior tempo de integração, sendo que o canal de exoplanetas também é mais sensível aos pixels brilhantes, pois envolve estrelas de magnitudes mais tênues.

Os dados da corrida IRa01 mostram que os pixels brilhantes se comportam de maneiras distintas. Alguns pixels têm decaimento exponencial, já outros apresentam um comportamento mais complicado com sucessão de passos para diferentes níveis de sinal telegráfico randômico (*Random Telegraph Signal*, RST). Portanto, faz-se necessário um método genérico para modelar e corrigir o sinal, método que possa ser aplicado ao decaimento exponencial e ao comportamento RST (PINHEIRO DA SILVA *et al.*, 2007 *apud* DRUMMOND *et al.*, 2008).

2.11 Eletrônica de leitura

2.11.1 Offset eletrônico

O *offset* é independente do tempo de integração e da temperatura do sensor e é induzido pelas características do *output* do sensor CCD e dos circuitos eletrônicos do processador do sinal.

O *offset* de cada sequência eletrônica pode ser medido através da leitura das saídas dos registradores do CCD. Cada CCD têm níveis de *offset* diferentes, assim como níveis de ganho diferentes. Os níveis de *offset* são lidos nos pixels de *prescan* e *overscan*. Normalmente o valor obtido nos pixels de *overscan* é utilizado. Assim que a correção é realizada, os pixels de *overscan* e *prescan* são removidos da imagem e a mesma fica com 2048x2048 (KARIOTY *et al.*, 2006).

O nível de *offset* é periodicamente registrado *onboard*, a cada 1 ou 32 segundos, para o canal de sismologia estelar e exoplanetas, respectivamente. Tais medidas consistem em uma média das linhas de *offset*.

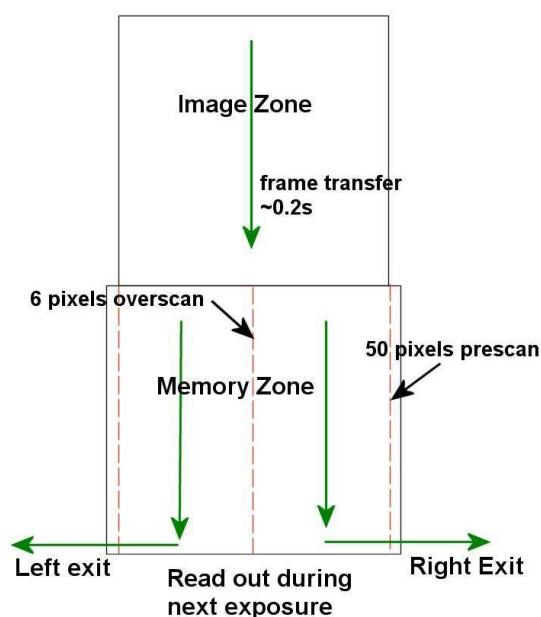


Figura 17 - Ilustração do funcionamento do CCD com indicação dos pixels de *prescan* e *overscan* (DRUMMOND, 2007)

2.11.2 Crosstalk

Verificou-se que, durante os testes de pós-integração, os diferentes ciclos de leitura de cada CCD são responsáveis por muitos distúrbios de padrão nas imagens adquiridas, assim como o acoplamento eletrônico. Uma variedade de padrões de *crosstalk* pode ser observada em imagens vindas de qualquer CCD. Tal perturbação é oriunda de um erro de casamento de impedâncias das saídas do sinal elétrico dos CCDs para a entrada do sistema de digitalização¹³.

As principais perturbações ditas *crosstalk* são entre os CCDs destinados à astrosismologia e à busca de exoplanetas. Todos os processos de leitura são sincronizados, o que significa que, durante uma corrida, a perturbação por *crosstalk* sempre afeta os mesmos pixels.

¹³ Comunicação pessoal sobre o presente trabalho com o Dr. Fábio de Oliveira Fialho.



Figura 18 - Padrão de perturbação em uma subimagem de 150x150 pixels do canal de exoplanetas (AUVERGNE *et al.*, 2009)

2.11.3 Ruído de leitura

O ruído de leitura é intrínseco à eletrônica analógica e ao processo de quantificação. O efeito global pode ser modelado como um ruído gaussiano aditivo. Uma estimativa do nível de ruído que corresponde a cada sequência eletrônica possui várias aplicações, como para determinação de aberturas fotométricas otimizadas, estimação da PSF, entre outros. O ruído de leitura é periodicamente computado e registrado *onboard*, com base no desvio padrão sobre a linha de *offset*.

3 Janelas de fundo de céu

Este capítulo visa explicar a atual técnica utilizada pelo CoRoT no que tange à alocação de janelas de fundo de céu e à estimação do mesmo, para o canal de exoplanetas.

O procedimento de correção de fundo de céu é padrão para a redução de dados fotométricos e, basicamente, consiste na subtração do nível de fundo de céu das medições fotométricas de uma estrela (SAMADI *et al.*, 2006).

É importante estimar o fundo de céu por causa das variações periódicas do mesmo, originadas por fontes de luz difusa (como a luz refletida pela Terra, por exemplo) que afetam as curvas fotométricas das estrelas em observação. A determinação do fundo de céu é bastante crítica para se obter medidas precisas (HOWELL, 1989), no caso, medidas fotométricas da estrela em observação, ao redor da qual se espera detectar um planeta orbitando.

Vale observar que, além da correção de fundo de céu, outras correções e processamentos são necessários nas curvas de luz. São eles: subtração do *offset* da curva de luz da estrela; correção de interferências eletromagnéticas; correção das variações de tempo de exposição; correção do efeito *jitter*; correção do *crosstalk*; correção do ganho; e correção de *outliers*.

Para a determinação do nível médio de fundo de céu, o CoRoT utiliza um conjunto de janelas de fundo de céu, que precisam ser alocadas de forma representativa, garantindo que as inhomogeneidades de fundo de céu presentes nos CCDs não permaneçam poluindo as curvas de luz após as correções instrumentais. Nas seções a seguir, a descrição das janelas de fundo de céu, dos métodos de alocação de janelas de fundo de céu e de estimação de fundo de céu.

As informações e descrições de métodos deste capítulo são quase que totalmente baseadas nos trabalhos de Drummond (2007, 2008), principal referência para a elaboração do presente trabalho.

3.1 Descrição das janelas de fundo de céu

No canal de exoplanetas, são observadas até 6000 estrelas por CCD e podem ser alocadas até 200 janelas de fundo de céu em cada um. Cada janela tem o tamanho de 10x10 pixels e, cerca de 100 janelas, são amostradas a 32 segundos e cerca de 300 a 512 segundos (considerando os dois CCDs do canal de exoplanetas. Por CCD, são aproximadamente 50 janelas amostradas a 32 segundos e 150 amostradas a 512 segundos). É importante que as janelas estejam alocadas em áreas sem a presença de estrelas “fracas”, e, segundo Drummond (2007), uma distribuição homogênea das janelas no CCD permite uma melhor compreensão do comportamento do fundo de céu. O tamanho das janelas de fundo de céu também é importante, sendo que precisa ser grande o suficiente para fornecer um nível de fundo de céu com precisão de 5% à 10%, porém não tão grande, pois as chances de a janela conter estrelas “fracas” aumentaria.

Para a estimação do tamanho das janelas de fundo céu, foram utilizadas a média e o desvio padrão do nível de fundo de céu esperado por pixel, como pode ser observado na equação que segue.

$$\frac{s}{N} \geq 10 \rightarrow \sqrt{n} \geq \frac{\sigma}{0,1 I_0},$$

onde σ é o desvio padrão esperado para o nível de fundo de céu por pixel, I_0 é o nível médio de fundo de céu esperado por pixel, n é o número de pixels na janela de fundo de céu e 0,1 representa a precisão escolhida, no caso, 10%.

3.2 Atual método de alocação das janelas de fundo de céu

O CoRoT utiliza até 200 janelas de fundo de céu a serem alocadas em cada um dos dois CCDs do canal de exoplanetas, com tamanho de 10x10 pixels, e as mesmas devem ser alocadas automaticamente em espaços livres de estrelas e de pixels quentes e frios.

O método atualmente utilizado divide o CCD em n regiões quadradas, com n inteiro e podendo ser diferente a cada corrida. Então, para cada região, aplica-se uma filtragem tipo *smooth*, por convolução. A partir do resultado da filtragem, determinam-se os mínimos locais e as janelas são alocadas nos locais de mínimos. A quantidade de janelas é distribuída igualmente entre as n regiões. Tal procedimento é realizado da seguinte maneira: uma janela, que chamaremos de *box smoothing*, é definida como um quadrado de tamanho $n \times n$ pixels preenchidos com 1's. A imagem convolucionada terá os valores mais baixos em posições a pelo menos $n/2$ pixels de distância de uma estrela, em seções de imagem que contém valores baixos. Então, ao se realizar a convolução na imagem inteira e ordenar os resultados, o valor mais baixo dará a melhor posição para a primeira janela e o resultado da convolução dos $n \times n$ pixels ao redor são então definidos como um valor alto para que nenhuma outra janela seja colocada neste local (pois muitas vezes o valor mais baixo seguinte é o pixel vizinho), e assim por diante.

Este método de alocação de janelas de fundo de céu quebra o problema original em subproblemas e toma como a solução do problema original o conjunto de soluções dos subproblemas. Infelizmente, o agrupamento das soluções dos subproblemas nem sempre é uma boa solução do problema original, principalmente, na presença de forte gradiente de fundo de céu. Na Figura 19a, por exemplo, estrelas posicionadas no centro do CCD terão seus fundos de céu muito mal estimados, pois nenhuma janela de fundo de céu foi alocada nesta região. Outro ponto negativo desta abordagem é que ela não leva em conta o impacto da escolha do método de estimação de fundo de céu na determinação das janelas de fundo de céu. Se decidir utilizar o método da janela mais próxima para estimar o fundo do céu, a alocação das mesmas deve ser feita de modo a minimizar a maior distância entre uma estrela e a sua janela mais próxima. Por outro lado, se o método escolhido for a triangularização, a escolha das janelas deve minimizar o número de extrapolações nas estimações de fundo de céu. Vale observar que inicialmente, a missão CoRoT cogitava utilizar o método de correção de fundo de céu da janela vizinha mais próxima, que será detalhado na próxima seção.

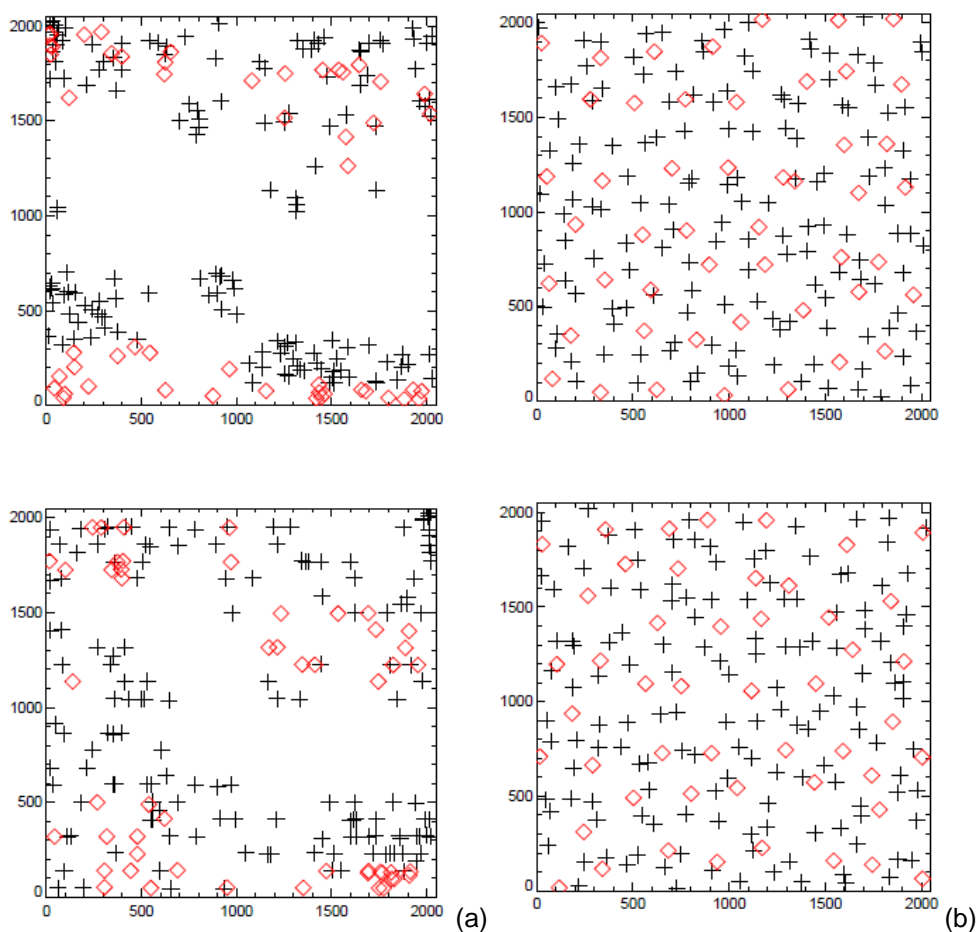


Figura 19 - (a) Distribuição das janelas de fundo de céu na corrida IRa01. As janelas amostradas a 512 segundos são representadas por cruzes e as amostradas a 32 segundos por losangos (DRUMMOND *et al.*, 2008). O CCD foi dividido em 4 regiões apenas, o que resultou em uma alocação de janelas não homogênea. (b) Distribuição das janelas na corrida LRc01. O CCD foi dividido em 49 regiões, o que resultou uma distribuição mais homogênea das janelas

3.3 Métodos de estimação de fundo de céu

Drummond (2007, 2008) também apresenta alguns métodos de estimação de fundo de céu das estrelas em observação a partir dos valores observados nas janelas. Tais métodos de estimação de fundo de céu interferem diretamente na solução que se espera obter para o problema em questão. Esta seção descreverá alguns métodos testados e o atualmente em uso pela missão CoRoT.

3.3.1 Janela vizinha mais próxima

O método mais intuitivo, e também o inicialmente proposto pela missão CoRoT. Utiliza a janela de fundo de céu mais próxima da estrela em observação para corrigir o fundo de céu da mesma. Se a estrela é superamostrada (32 segundos), e a janela mais próxima a ela é amostrada a 512 segundos, então a correção de fundo de céu pode ser interpolada para o tempo correto. Em suma, uma janela de fundo de céu se torna padrão para um conjunto de estrelas espacialmente mais próximas dela.



Figura 20 - Estrelas e as janelas de fundo de céu espacialmente mais próximas delas

3.3.2 Interpolação triangular

Este método foi inicialmente proposto para casos onde não há uma janela espacialmente próxima de uma estrela e também para o caso de haver gradiente de fundo de céu não-homogêneo. É realizada a interpolação ou extrapolação das três janelas de fundo de céu mais próximas à estrela em observação, calculando-se a equação paramétrica do plano definida pelas medidas de fundo de céu nas três janelas de fundo de céu, e calculando o valor do fundo de céu na posição da estrela.

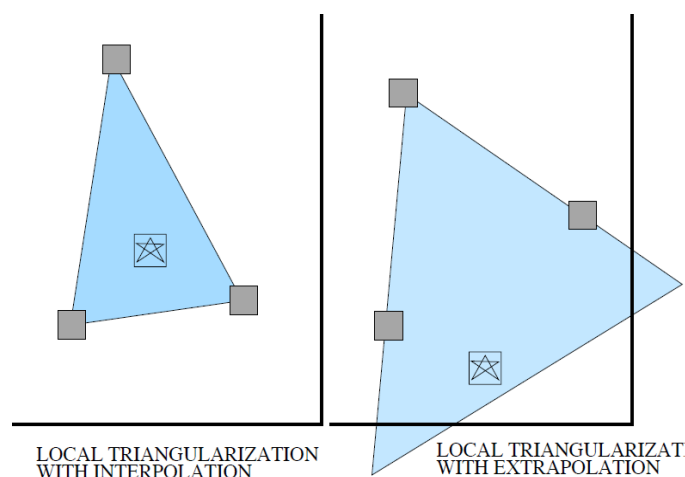


Figura 21 - Interpolação e extrapolação triangular (SAMADI *et al.*, 2006)

3.3.3 Mediana

O método da mediana é o método de estimação de fundo de céu atualmente em uso pela missão CoRoT.

A técnica calcula a mediana das janelas de fundo de céu de cada CCD e este valor é considerado como o fundo de céu para todas as estrelas. Ou seja, um único valor de mediana será subtraído das curvas fotométricas de todas as estrelas em observação. Vale lembrar que as janelas amostradas a 512 segundos tem uma mediana e as amostradas a 32 segundos tem outro valor calculado de mediana, assim, as estrelas amostradas a 512 segundos terão seus fundos de céu corrigidos com a mediana obtida das janelas de 512 segundos, o mesmo ocorre para as estrelas de 32 segundos.

Tal método se mostra o mais eficiente na análise de Drummond *et al.* (2008), sobretudo por corrigir o problema das variações orbitais de fundo de céu, uma vez que o CoRoT mede variações fotométricas e não fotometrias absolutas.

3.3.4 Ajuste polinomial

O intuito deste método é utilizar todos os dados disponíveis, por exemplo, as 400 janelas, considerando ambos CCDs, o que possibilita modelar o fundo de céu a uma resolução maior, usando aproximadamente 100 janelas de 32 segundos. Tal método poderia dar uma melhor ideia sobre as variações orbitais, mas, por outro lado, a resolução espacial é notavelmente menor utilizando menos janelas.

Inicialmente, o ajuste polinomial testado apresenta a seguinte estrutura:

$$fluxo = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

A equação acima representa um fundo de céu em forma parabólica, mas pode-se imaginar que ocorra um gradiente horizontal neste caso, e que seria mais apropriado usar somente a_0 ou a_2 ou a_3 . Foram realizados testes com todas as opções, a fim de observar se aumentando mais um grau de complexidade ao ajuste diminuiria o valor de χ^2 do resultado de maneira significativa. Drummond *et al.* (2008) realizou então uma regressão linear múltipla para as janelas de fundo e suas coordenadas, pois permite simples modificações do número de coeficientes que se quer ajustar e se mostrou robusto o suficiente.

Testes iniciais foram necessários para a determinação da ordem do polinômio e se os CCDs deveriam ser tratados como uma única superfície ou separadamente. A qualidade do ajuste foi analisada pelo valor não normalizado do *chi* quadrado:

$$\chi^2 = \sum (F(x, y)_t - Z_t)^2$$

Onde $F(x, y)$ é o ajuste dos valores de fundo de céu nas posições x e y da janela no tempo t e Z é o valor de fundo de céu da janela deixada de fora do ajuste.

Os testes mostraram que usar o ajuste polinomial com 6 coeficientes gera um χ^2 menor do que usando 3 coeficientes ($fluxo = a_0 + a_1x + a_2y$), ou ainda do que utilizando 4 coeficientes.

Os demais testes foram focados no uso de 3 coeficientes, pois assim o ajuste torna-se rápido, o que é de extrema importância para o projeto, pois encontrar a janela mais próxima (primeiro método aqui explicado) é bastante rápido.

3.3.5 DWA

Reegen *et al.* (2006) descreve um método chamado de *distance-weighted average* (DWA), que em seu trabalho é utilizado para identificar e corrigir *outliers*. Segundo Drummond *et al.* (2008), este método descreve uma opção “entre” o método da janela vizinha mais próxima e a mediana, posto que resulta em uma correção de fundo de céu onde a janela mais próxima é a mais importante para estimar o fundo de céu, mas todas as outras janelas também são utilizadas de acordo com sua distância relativa ao ponto no qual queremos determinar o fundo de céu (no caso, na estrela).

O DWA, como já citado, é baseado na suavização de dados por *distance-weighted average*, similar ao filtro de Whittaker (WHITTAKER, 1923 *apud* REEGEN *et al.*, 2006) ou ao filtro de Hodrick-Prescott (HODRICK, PRESCOTT, 1997 *apud* REEGEN *et al.*, 2006). Em suma, para um pixel na posição (l, m) em um instante de tempo n , o fundo de céu pode ser estimado usando outras janelas de fundo de céu no mesmo instante de tempo, utilizando

$$F_{\lambda}(x, y) \equiv \frac{\sum_{x,y} R_{lm} I_{lmn}}{\sum_{x,y} R_{lm}}, \text{ e}$$

$$R_{lm} \equiv [(x - l)^2 + (y - m)^2]^{-\frac{\lambda}{2}},$$

onde λ é um inteiro positivo, representando o coeficiente de suavização.

3.4 Análise dos métodos

Dos métodos testados por Drummond *et al.* (2008), mediana e ajuste polinomial são mais eficientes e insensíveis ao problema do pixel brilhante, mas o método da mediana é, sobretudo, mais eficiente para corrigir o problema das variações orbitais de fundo de céu, apesar do fato de todas as estrelas do CCD serem corrigidas com o mesmo fundo de céu.

Os dados utilizados por Drummond *et al.* (2008) possuem as mesmas correções que os dados utilizados neste trabalho, porém, Drummond *et al.* (2008) sugere um método de correção de pixel brilhante não disponível para este trabalho, e também não utilizado oficialmente pela missão CoRoT. Com relação aos dados da corrida Ira01 (dados de 09 de fevereiro de 2007 à 01 de março de 2007) utilizados no presente trabalho, são exatamente os mesmos utilizados por Drummond, porém, com relação à corrida LRc01, foram disponibilizados para este trabalho dois conjuntos de dados, sendo um do dia 16 de maio de 2007 ao dia 21 de maio de 2007 e o outro conjunto do dia 21 de maio de 2007 ao dia 30 de maio de 2007. Drummond utilizou dados da corrida LRc01 de 21 de maio de 2007 à 30 de junho de 2007.

Os dados disponibilizados para o presente trabalho, apresentam correção de *outlier* (indicada pelo campo OUTLIERC = 2 no cabeçalho dos dados)¹⁴. O OUTLIERC é uma correção de qualquer ponto que esteja acima de n sigma de uma média móvel de m pontos, onde m e n são definidos previamente. Pixels brilhantes e impactos de prótons ou outras partículas são tipicamente os problemas detectados por esta correção¹⁵. Os dados utilizados para testes também estão com as devidas correções em função da passagem pela AMAS.

A comparação entre os métodos foi realizada com a técnica *jackknifing*, por meio da qual se aumenta a análise estatística de um conjunto pequeno (N valores) executando análises de conjuntos de dados em muitos dos $N-1$ valores. No contexto das janelas de fundo de céu isto significa que, para analisar a qualidade de cada

¹⁴ Descrição detalhada sobre elementos presentes nos cabeçalhos dos dados foram obtidos no documento *Description of the N1 Products Generated at the Mission Control Center (CMC)*.

¹⁵ Informações fornecidas pelo Dr. Fábio de Oliveira Fialho via e-mail em setembro de 2011.

método de correção, não se considera no método uma das 200 janelas de fundo de céu por CCD e, em seguida, compara-se o resultado do método com o valor do n -ésimo ponto. Para cada método que passou pela inspeção preliminar (valores *chi* quadrado e histograma de verificação de diferenças), foi realizado o teste de *jackknifing*. Com o intuito de comparar a qualidade das correções, foi examinada a distribuição das diferenças entre o valor previsto na posição do *jackknife* e os pontos de dados reais.

Desta maneira Drummond *et al.* (2008) considera que o método da mediana é o mais indicado. Mesmo verificando que o DWA pode apresentar bons resultados, a mediana é considerada mais adequada, pois é robusta aos *outliers*.

4 Métodos de alocação das janelas de fundo de céu

Este capítulo propõe dois novos métodos para a alocação das janelas de fundo de céu nos CCDs. O primeiro método é chamado de *k-box*, e considera que o método de estimação de fundo de céu que será utilizado após a alocação das janelas é o da janela mais próxima. Já o segundo método é chamado de *k-min*, que aloca as *k* janelas em regiões de mínimos globais separadas por certa distância.

4.1 Características das imagens completas de fundo de céu

Na Figura 22, pode-se ver uma imagem completa do céu, obtida antes do início da aquisição dos dados da corrida LRc01. Esta imagem está no formato *FITS*¹⁶ e tem dimensão de 2048x2048 pixels, onde cada pixel é do tipo *double* (ponto flutuante de 8 bytes) e os valores mínimo e máximo são, respectivamente, -0,921000 e 133344,921875. Nesta imagem podem ser constatados alguns efeitos, como o *jitter* e *blurring*, eventual passagem de algum objeto (Capítulo 2, Seção 2.7), saturação na imagem e pixels impactados.

Após mudança de brilho e contraste da Figura 22, obtém-se a Figura 23, onde alguns efeitos característicos ficam mais evidentes. Já a Figura 25, mostra apenas uma parte da imagem completa ampliada, novamente com correções de brilho e contraste, onde se pode notar a presença de pixels impactados, o efeito da movimentação do satélite e que não há muitas opções de posições espaciais onde possam ser alocadas as janelas de fundo de céu de tamanho 10x10 pixels.

A Figura 24 mostra detalhes de alguns efeitos encontrados nas imagens completas de fundo de céu. Por fim, a Figura 26 mostra uma parte da imagem completa do céu sobreposta com as janelas de fundo de céu amostradas a 32 segundos (em verde), janelas amostradas a 512 segundos (em azul) e estrelas alvos (em vermelho).

¹⁶ *Flexible Image Transport System*. O formato de arquivo FITS é comumente utilizado em astronomia, sendo um utilizado principalmente por instituições de pesquisa espacial, para armazenamento e troca de imagens astronômicas.

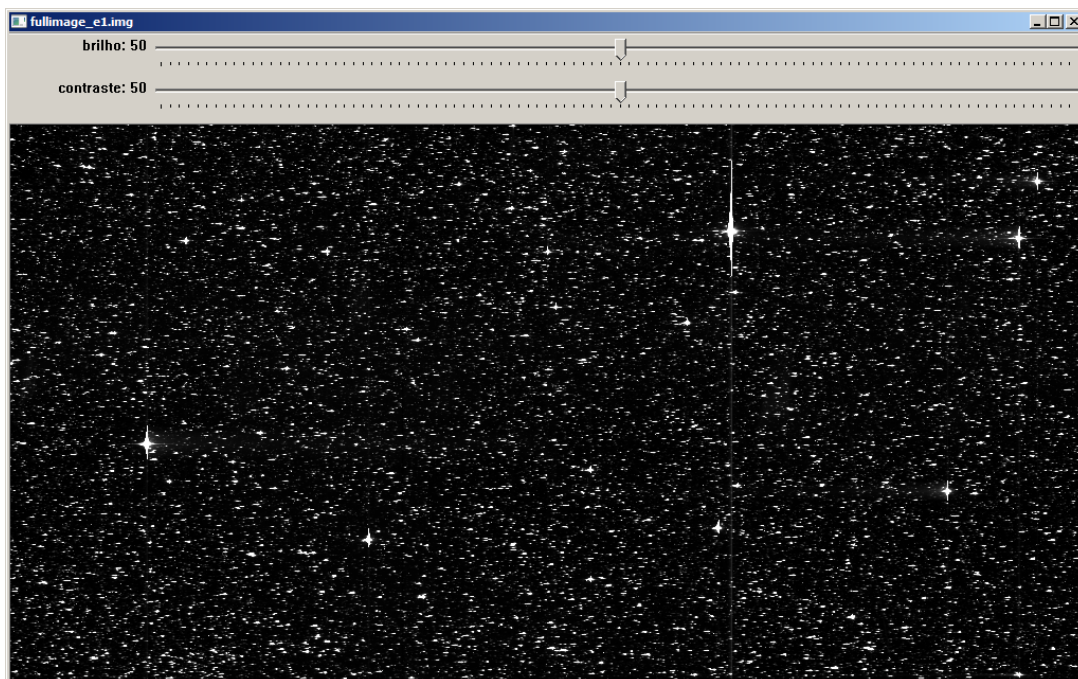


Figura 22 - Imagem completa do fundo de céu

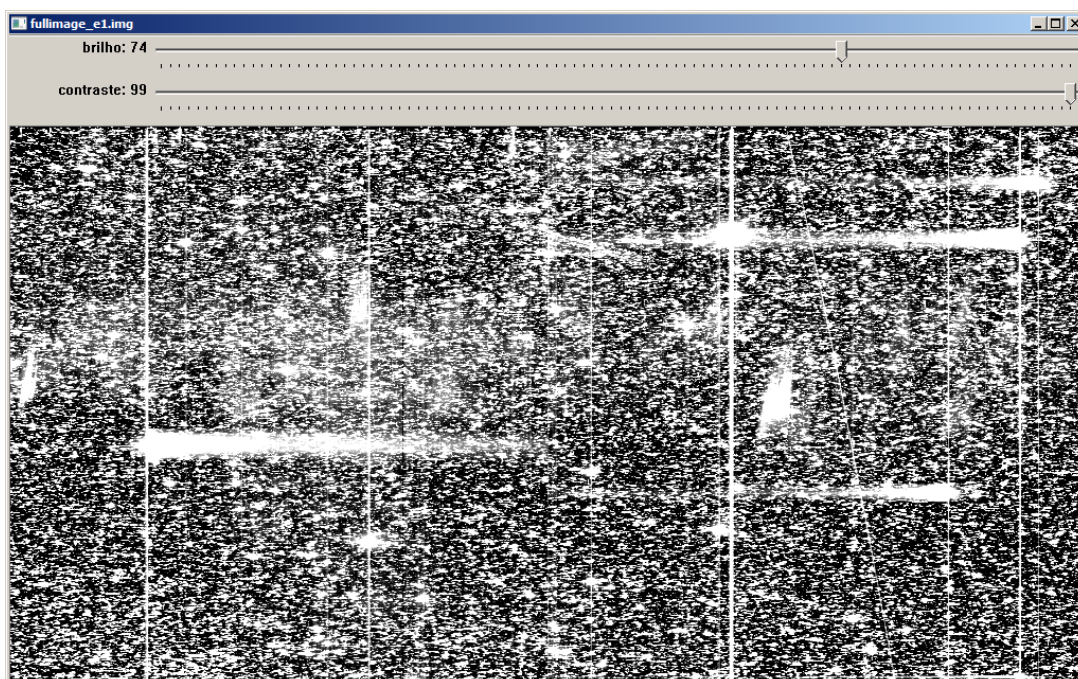


Figura 23 - Imagem completa com correção de brilho e contraste

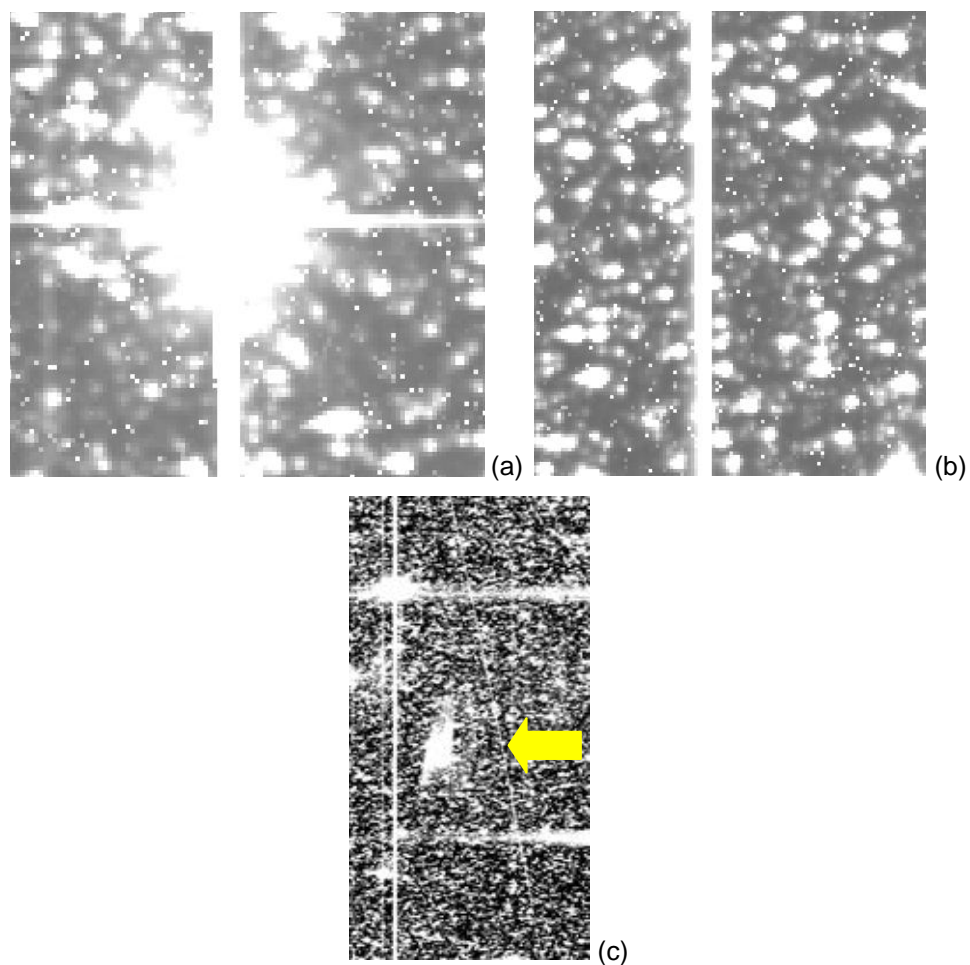


Figura 24 - Detalhes da Figura 23. (a) Estrela saturada. (b) *Smearing*, efeito gerado na transferência das linhas da zona de imagem para zona de memória no CCDs. (c) Passagem de algum objeto na baixa órbita terrestre (provavelmente lixo espacial)

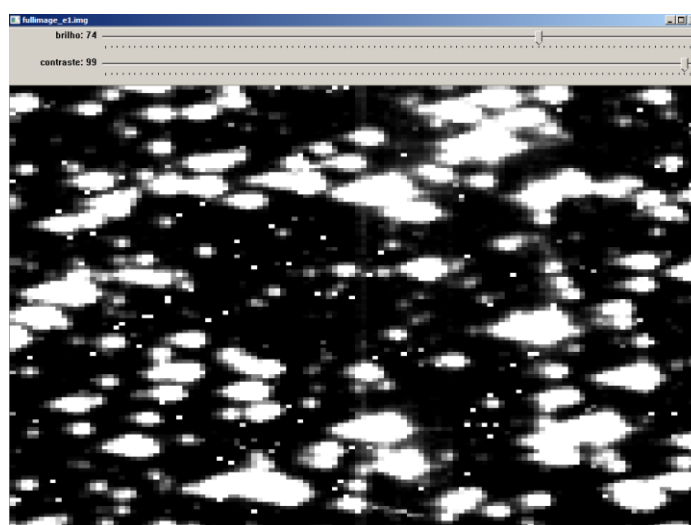


Figura 25 - Detalhe da imagem completa do céu

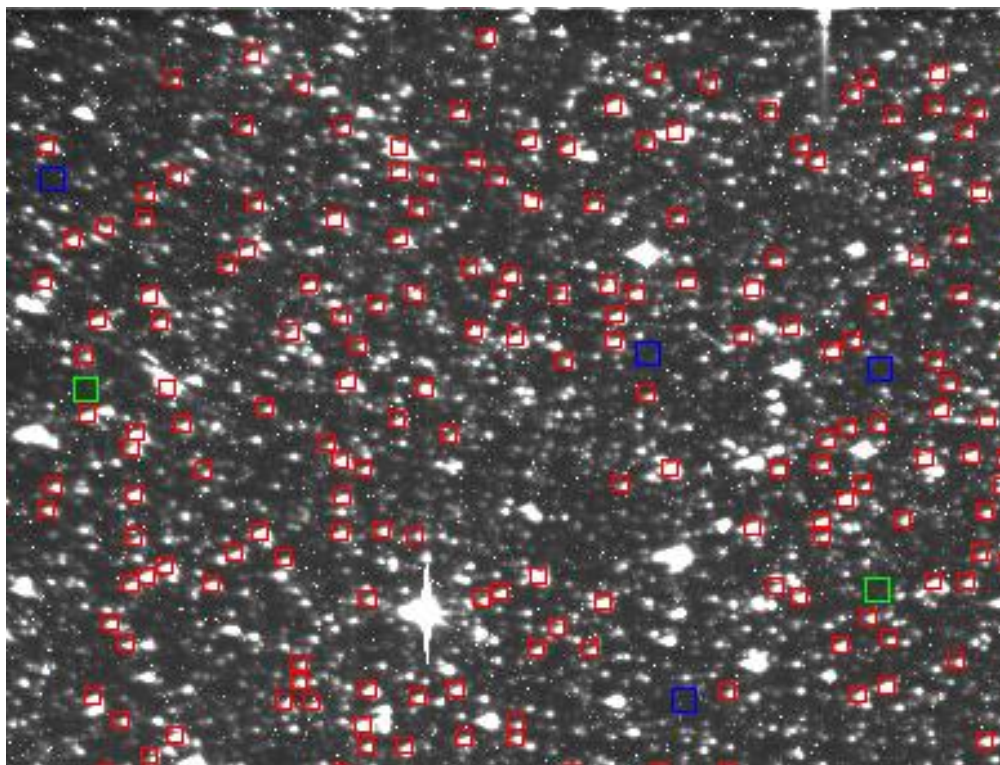


Figura 26 - Uma região da imagem completa com janelas de fundo de céu de 32s em verde, janelas de fundo de céu de 512s em azul e estrelas alvos em vermelho

4.2 Método *k*-box

O método *k*-box supõe que a estimação de fundo de céu usará o método da janela mais próxima, onde o valor do ruído de fundo de céu de uma estrela s é considerado aproximadamente igual ao valor do ruído observado na janela w espacialmente próxima de s . Quanto mais próxima for a janela w da estrela s , melhor a estimativa do fundo de céu. Para que esta estratégia funcione é necessário que cada estrela tenha uma janela espacialmente próxima. Em outras palavras, é necessário minimizar a maior distância entre uma estrela s e a janela w mais próxima de s .

Formalizando, o problema consiste em: dadas m posições de estrelas-alvos s_j ($1 \leq j \leq m$) e um número k de janelas, é necessário encontrar a distribuição das k janelas $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_k\}$ que minimize a função custo:

$$f(W) = \text{MAX}_{i=1}^k \left[\text{MAX}_{s_j \in \eta_i} [d(w_i, s_j)] \right],$$

onde $d(w_i, s_j)$ é a distância euclidiana entre a janela w_i e a estrela s_j ; e η_i é o conjunto de estrelas que pertencem à “zona de influência” da janela w_i . A zona de influência η_i de uma janela w_i é a região espacial onde a janela mais próxima é w_i . Isto é, se uma estrela $s_j \in \eta_i$ então $d(w_i, s_j) \leq d(w_l, s_j)$ para $\forall l \neq i$.

No caso do satélite CoRoT, tipicamente utilizam-se $k = 200$ janelas de fundo de céu para estimar a fotometria de $m \leq 6000$ estrelas, e a imagem tem tamanho 2048x2048 pixels.

A seguir, algumas soluções que foram testadas para resolver o problema descrito anteriormente, antes do desenvolvimento do k -box.

4.2.1 Algoritmo aleatório

Trata-se da solução mais imediata para o problema descrito anteriormente, pois consiste em distribuir aleatoriamente as k janelas w_i dentro da imagem N vezes, gerando assim as distribuições aleatórias das janelas, que chamaremos de $W_1, W_2, W_3, \dots, W_N$. Para cada distribuição W_j , calcula-se a função custo $f(W)$, e é escolhida a distribuição W^* com o menor custo, ou seja, onde se tem a menor maior distância entre uma estrela s e uma janela w . Evidentemente, este algoritmo não é eficaz posto que apenas distribui aleatoriamente janelas e escolhe a melhor distribuição, sem tentar melhorar as distribuições.

4.2.2 Algoritmo k -médias

O problema de minimização da média das distâncias quadráticas é bem conhecido e pode ser resolvido com o algoritmo de agrupamento por k -médias (*k-means clustering*). Infelizmente, esse algoritmo não pode ser utilizado para o problema em questão, pois o objetivo é minimizar a maior distância e não a média das distâncias quadráticas. O algoritmo k -médias foi utilizado como inspiração para criar o k -box.

Dada uma distribuição inicial W^0 de k janelas, o algoritmo de agrupamento por k -médias otimiza iterativamente a distribuição, gerando uma solução melhor a cada iteração W_1, W_2, W_3, \dots até a convergência em W^* . Dadas m posições de estrelas-alvos s_j e a distribuição das janelas $W^t = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ na iteração t , um passo do algoritmo k -médias é:

- a. Para cada janela w_i na iteração t , achar o conjunto de estrelas de η_i , isto é, as estrelas que estão mais próximas de w_i do que de qualquer outra janela.
- b. Mover cada janela w_i para o centro geométrico das estrelas em η_i .

O algoritmo k -médias consiste em repetir os dois passos acima até a convergência. A solução final obtida W^* depende fortemente da distribuição inicial W^0 . Assim, a distribuição inicial deve ser escolhida cuidadosamente. Por exemplo, utilizando-se o algoritmo corte mediana (*median cut*) (HECKBERT, 1982). Também se pode repetir o algoritmo k -médias para N distribuições iniciais aleatórias e escolher a solução ótima de menor custo.

4.2.3 Algoritmo k -box

O algoritmo proposto neste trabalho, chamado de k -box, é uma versão modificada do algoritmo k -médias. Dadas m posições de estrelas-alvos s_j , um número k de janelas e uma distribuição das janelas $W^t = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ na iteração t , um passo do algoritmo k -box é:

- a. Para cada janela w_i da iteração t , achar o conjunto de estrelas em η_i , isto é, as estrelas que estão mais próximas de w_i do que de qualquer outra janela.
- b. Achar o seu *bounding box* (daqui em diante, chamaremos simplesmente *box*) das estrelas de η_i , isto é, o menor retângulo alinhado aos eixos e que contém todas as estrelas de η_i . A Figura 27 ilustra um *box*. Mover cada janela w_i para o centro geométrico do seu *box*. O passo b normalmente diminuirá $\text{MAX}_{j \in \eta_i} [d(w_i, s_j)]$.

O algoritmo *k-box* consiste em repetir os dois passos acima até a convergência. Da mesma forma que o algoritmo *k-médias*, a solução final de *k-box* depende fortemente da distribuição inicial de janelas W^0 escolhida. Assim, executa-se repetidamente o algoritmo *k-box* para N distribuições iniciais aleatórias de janelas e se escolhe a melhor solução.

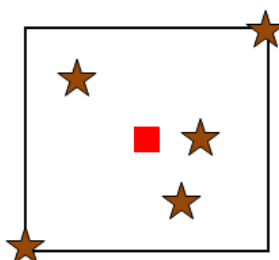


Figura 27 - *Bounding box* (ou simplesmente *box*) de uma janela (em vermelho) com as estrelas mais próximas dela

4.2.4 Implementação e testes

Os três algoritmos (aleatória, *k-médias* e *k-box*) foram implementados em C++, com o uso da biblioteca ProEikon¹⁷, sem otimizações de velocidade. As implementações de *k-box* e *k-médias* apresentam um gargalo, que é o cálculo das estrelas que pertencem à zona de influência η_i de uma janela w_i . Para isso, calculam-se as distâncias de w_i com todas as estrelas, o que é um processo computacionalmente lento. Este cálculo pode ser acelerado com a utilização do algoritmo *kd-tree* (SEGEWICK, 1986) ou algum outro algoritmo que acelere o cálculo do vizinho mais próximo.

Nos testes apresentados na Tabela 1, foram gerados aleatoriamente $m = 200$ estrelas dentro de uma imagem com 1024x640 pixels. Estes testes foram realizados em imagens menores que o tamanho real do CCD, pois é mais fácil visualizar o comportamento dos algoritmos nas imagens menores. Depois, executou-se o algoritmo aleatório $N = 10000$ vezes e se escolheu a melhor solução. Também

¹⁷ Disponível em: <http://www.lps.usp.br/~hae/software>

se executou os algoritmos k -médias e k -box $N = 5000$ vezes e se escolheu a melhor solução. Estes testes foram repetidos 3 vezes.

Tabela 1 - O custo da solução (a maior distância entre uma estrela e a janela mais próxima, em *pixels*) encontrada pelos três algoritmos

	Algoritmo aleatório	Algoritmo k -médias	Algoritmo k -box
Teste 1	131,8	95,7	85,7
Teste 2	132,4	96,0	86,3
Teste 3	131,9	97,7	89,2
Média	132,0	96,5	87,1

Os três algoritmos levaram em média 25s, 13s e 15s respectivamente para encontrar as soluções da Tabela 1. Fica claro que o algoritmo k -box encontrou a melhor solução nos três testes. As Figuras 28, 29 e 30 mostram os resultados obtidos no teste 1, onde os retângulos vermelhos mostram os *boxes* das janelas, o ponto vermelho no centro de um *box* é a janela, os pontos azuis são as estrelas, as linhas amarelas ligam uma janela a todas as estrelas vizinhas, e a linha azul é a maior distância entre uma estrela e a sua janela mais próxima.

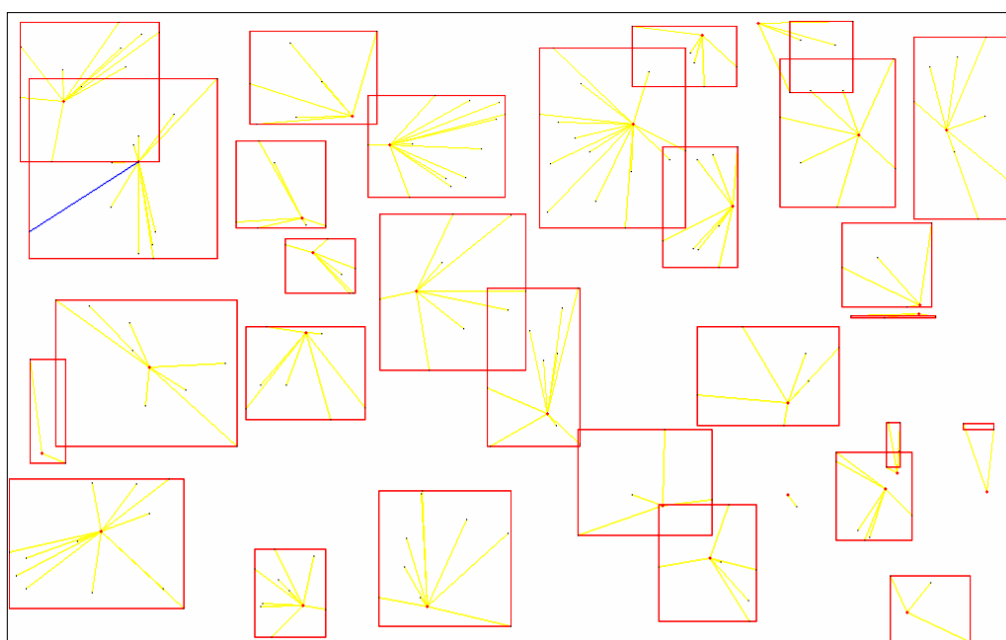


Figura 28 - A melhor solução obtida pelo algoritmo aleatório no teste 1

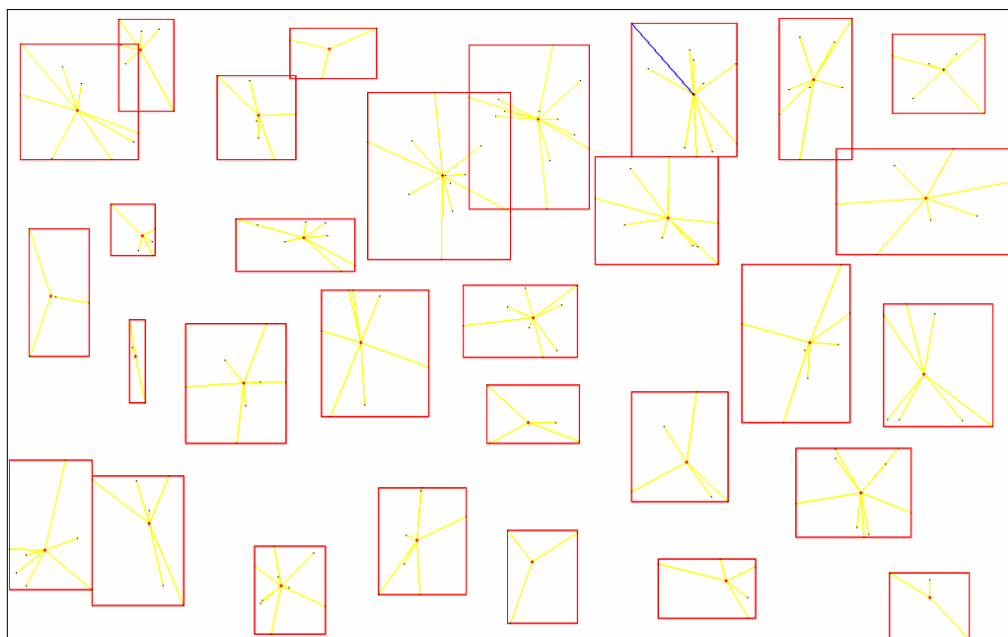


Figura 29 - A melhor solução obtida pelo algoritmo *k*-médias no teste 1

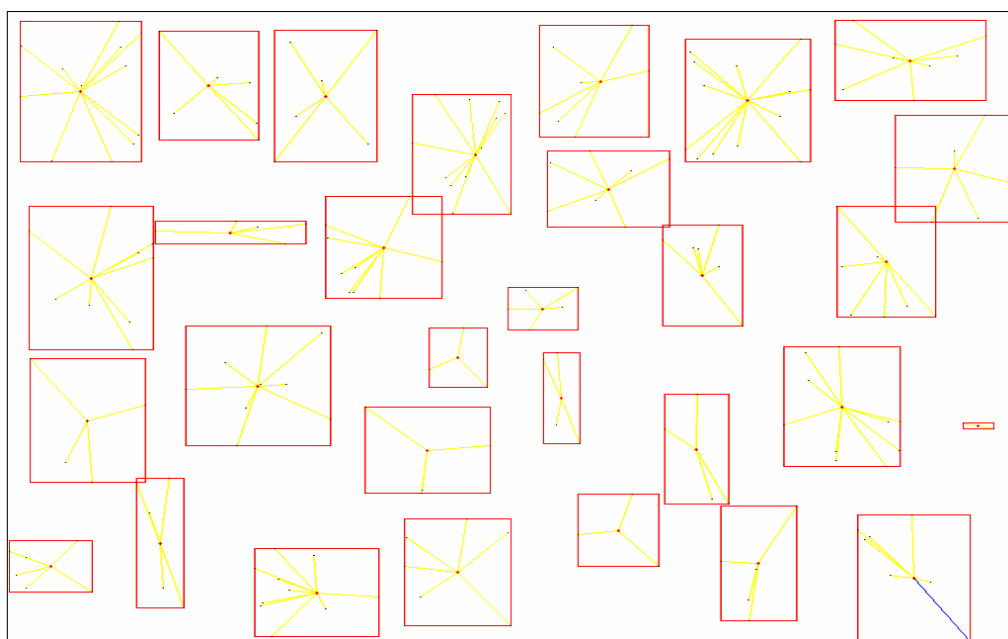


Figura 30 - A melhor solução obtida pelo algoritmo *k*-box no teste 1

Nos testes apresentados a seguir, foram utilizadas as posições reais das 5724 estrelas observadas na corrida LRc01 e a imagem tem tamanho real de 2048x2048 pixels. Executou-se o algoritmo aleatório $N = 1000$ vezes e escolheu-se a melhor solução. Também foram executados os algoritmos *k*-médias e *k*-box $N = 100$ vezes e se escolheu a melhor solução. O algoritmo aleatório apresentou custo da solução, em pixels, de 183,1; o algoritmo *k*-médias 109,7 e o algoritmo *k*-box 99,7.

A seguir, para exemplificar, uma imagem de 2048x2048 pixels, com 5724 estrelas na posição real (corrida LRc01) e 200 janelas alocadas pelo método *k*-box. Para obter o resultado mostrado na Figura 31, foram testadas 100 distribuições iniciais de janelas.

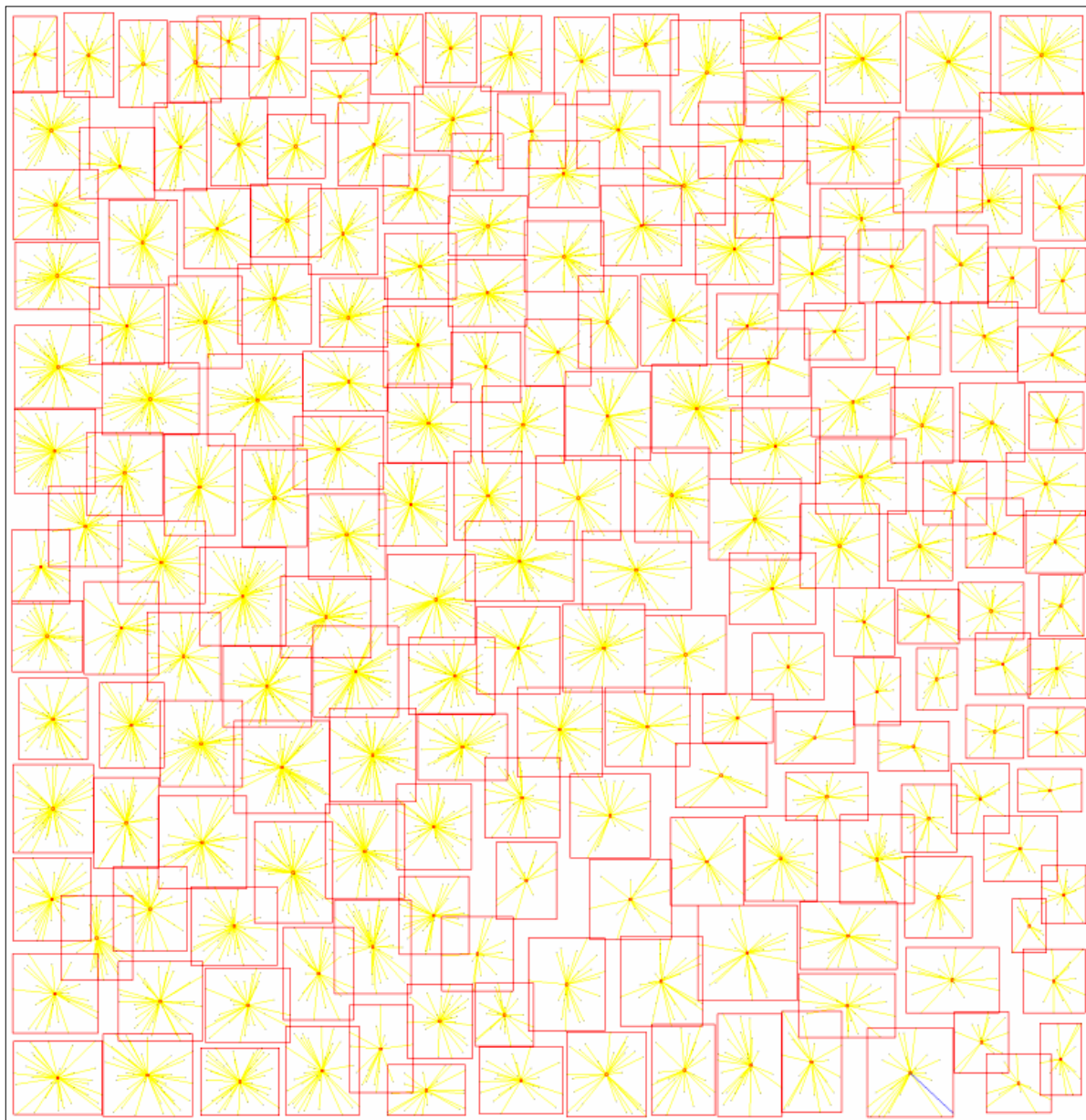


Figura 31 - Solução do *k*-box utilizando os dados do CoRoT, da corrida LRc01

4.2.5 Posições possíveis para janelas *k-box*

O passo seguinte à execução do *k-box* é encontrar as posições onde realmente é possível alocar as janelas de fundo de céu. O algoritmo *k-box* aloca as janelas utilizando somente a posição das estrelas alvos e a quantidade k das janelas. Assim, nada garante que as posições finais dadas pelo *k-box* sejam posições livres de estrelas parasitas, pixels impactados, entre outros.

Inicialmente, adotou-se uma solução bastante simples para definir as posições onde alocar as janelas. A solução consiste nos seguintes passos:

- a. Calcular o valor médio m de fundo de céu na imagem completa (isto é, a média das quatro imagens completas) nas posições das janelas;
- b. Estabelecer um limiar. Para os testes a seguir foi utilizado $1,2m$ como limiar;
- c. Obter uma imagem máscara que determina (provavelmente) onde é e onde não é a região de fundo de céu, exemplificada na Figura 32;
- d. Marcar como possíveis candidatas as posições onde cabem janelas 10×10 pixels;
- e. Alocar as janelas nas posições candidatas mais próximas das posições fornecidas por *k-box*.

O principal problema deste procedimento é que há poucas posições na imagem onde as janelas 10×10 podem ser alocadas, livre de pixels brilhantes e estrelas (ver Figura 25). Assim, as posições finais das janelas podem estar situadas longe dos resultados fornecidos pelo algoritmo *k-box*. Isto faz com que o algoritmo *k-box* perca sentido.

O limiar $1,2m$ acaba considerando como fundo de céu muitos pixels com algum brilho, distorcendo o cálculo do valor de fundo de céu. Se baixar esse limiar, pode não haver posições onde seja possível alocar as janelas.

Seria necessário modificar o *k-box* para que minimizasse a maior menor distância entre as janelas e as estrelas, considerando a imagem máscara (que define onde as janelas podem e onde não podem ser alocadas). Esta modificação não é trivial e não foi encontrada ainda uma solução para este problema.

Outros detalhes a serem considerados em trabalhos futuros são o limiar de $1,2m$ adotado para os testes e a utilização dos pixels brilhantes como restrição da solução. Ao invés de utilizar o limiar de $1,2m$ escolhido aleatoriamente, poderia ser utilizado 7σ do ruído para o limiar; e ao invés da utilização dos pixels brilhantes como restrição da solução, o ideal seria aceitar p pixels brilhantes dentro das janelas de fundo de céu, o que garantiria um compromisso entre a qualidade das imagens no início da vida útil do satélite e no fim da vida útil do satélite.

Por estes motivos e por outros que serão descritos no Capítulo 5, optou-se pelo método *k-min*, apresentado abaixo, como sendo o mais indicado.

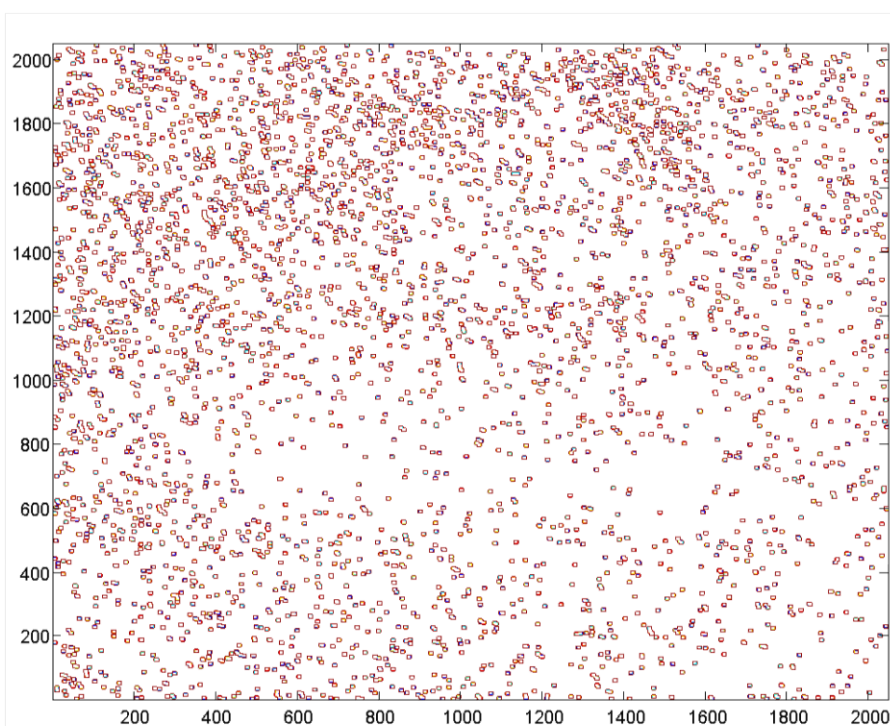


Figura 32 - Imagem máscara, onde os quadrados representam as possíveis posições para alocação de janela. A orientação desta figura não é a mesma das seguintes

4.3 Método *k-min*

O algoritmo *k-box* primeiro distribui as janelas para que todas as estrelas alvos tenham uma janela próxima, sem olhar se é possível alocar as janelas nas posições escolhidas (isto é, se essas posições estão livres de pixels brilhantes e estrelas). O

problema é que existem poucas posições livres de pixels brilhantes e estrelas, o que faz este algoritmo perder o sentido.

O algoritmo *k-min* foi desenvolvido diante de duas hipóteses:

1. Há poucas posições livres de pixels brilhantes e estrelas; e
2. As estrelas alvos estão distribuídas densa e uniformemente em toda a imagem.

O algoritmo *k-min* primeiro procura as posições livres de pixels brilhantes e estrelas. Depois, descarta as janelas que estão muito próximas de outras janelas já alocadas.

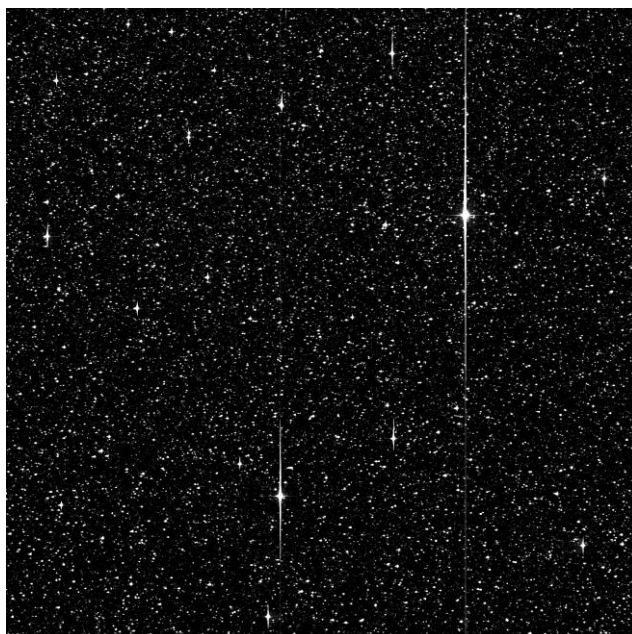


Figura 33 - Imagem completa do CCD1, antes da corrida LRc01, na qual serão alocadas as janelas de fundo de céu

Dada uma imagem completa do céu I (utilizamos a média das quatro imagens completas obtidas antes do início da corrida), o tamanho da janela (10×10 pixels, no caso), e a quantidade de janelas $k > 0$, o objetivo do algoritmo *k-min* é alocar as k janelas $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_k\}$ nas posições de mínimos globais da imagem I distribuindo as janelas de forma mais ou menos uniforme espacialmente. Para isso, utiliza-se um parâmetro crítico d_{min} : a menor distância permitida entre duas janelas,

O algoritmo *k-min* primeiro filtra a imagem I pela média móvel com núcleo 10×10 , obtendo a imagem filtrada J . Depois, ordena todos os pixels de J em ordem crescente

pelo seu valor. A janela w_1 será o pixel de J com o menor valor, isto é, $J(w_1)$ será o menor valor de J . Isto garante que w_1 esteja livre de estrelas e pixels brilhantes (na medida do possível). A janela w_2 será alocada na posição do pixel com o próximo menor valor que satisfaz $|w_1 - w_2| \geq d_{min}$. De um modo geral, a janela w_i deverá satisfazer $|w_i - w_j| \geq d_{min}, \forall j < i$.

Para aumentar a eficiência computacional, na verdade todos os pixels de J não foram ordenados pelo valor. Em vez disso, foi utilizada a estrutura de dados conhecida como fila de prioridades (*priority queue*) também conhecida como morro (*heap*). Esta estrutura de dados permite escolher o menor elemento de um conjunto e apagá-lo do conjunto sem ter de ordenar explicitamente todos os elementos.

A distância d_{min} não pode ser muito pequena, pois há a possibilidade de as janelas serem alocadas muito próximas umas das outras, não distribuindo as janelas uniformemente na imagem. Por outro lado, a distância d_{min} não pode ser muito grande, pois há a possibilidade de o método não conseguir alocar todas as k janelas garantindo a distância mínima entre elas. Usando d_{min} grande, mesmo que consiga alocar todas as k janelas separadas pela distância mínima, há a possibilidade de que as últimas janelas alocadas estejam em posições com estrelas ou pixels brilhantes, isto é, $J(w_i)$ seja grande nas últimas janelas.

Uma maneira de se determinar qual a d_{min} apropriada seria considerar que cada uma das k janelas de fundo de céu possui uma “zona de domínio” circular em volta dela. Uma vez que a imagem completa de fundo de céu possui área l^2 (no caso $l^2 = 2048 \times 2048$ pixels), se as janelas estiverem bem distribuídas cada “zona de domínio” terá área $A = l^2/k$ pixels². Sendo o diâmetro d do círculo de área $A = \pi(d/2)^2$, a estimativa inicial de d_{min} poderá ser um número um pouco menor que:

$$d = (2l)/\sqrt{\pi k}$$

Escolhe-se um número um pouco menor que d , pois as janelas não estarão distribuídas de forma perfeitamente uniforme na prática.

A seguir os resultados de algumas simulações do método *k-min*. A Figura 34 mostra uma comparação de alocações, todas para $k = 200$ janelas. Neste caso, usando a equação acima, obtemos $d = 164$. Pode-se observar na Figura 33 que para $d_{min} =$

50, muito menor que d , as janelas não ficam alocadas uniformemente. Já com $d_{min} = 120$, próximo do d calculado, observa-se uma alocação mais uniforme. Com $d_{min} = 80$ a alocação é melhor do que com $d_{min} = 50$, porém não mais uniforme do que a com $d_{min} = 120$. Por fim, com $d_{min} = 200$, maior que d , não foi possível alocar todas as janelas, sendo que apenas 83 janelas puderam ser alocadas.

Para todas as simulações estão sendo desprezados os 15 pixels das bordas da imagem, que são mais escuros e que induziam a uma alocação indevida das janelas de fundo de céu.

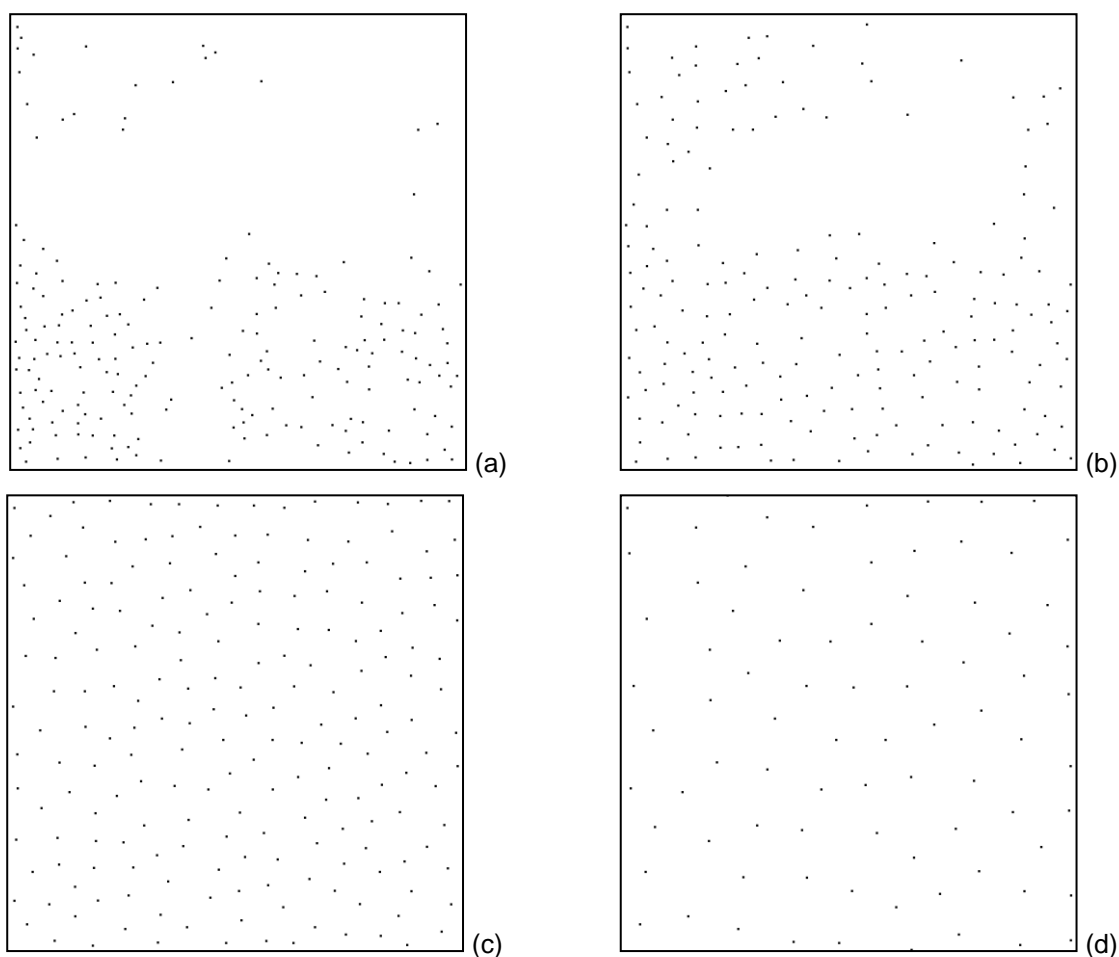


Figura 34 - Alocação de 200 janelas pelo método $k-min$. (a) 200 janelas alocadas com $d_{min} = 50$. (b) 200 janelas alocadas com $d_{min} = 80$. (c) 200 janelas alocadas com $d_{min} = 120$. (d) Não foi possível alocar as 200 janelas, apenas 83 foram alocadas com $d_{min} = 200$

4.4 Análise dos métodos *k-box* e *k-min* na imagem completa

Na Tabela 2 estão os valores médios e os desvios padrões dos valores de elétrons/pixel medidos em cada janela de fundo de céu na imagem completa. No caso, as medições foram realizadas na imagem que é a média das quatro imagens completas obtidas antes do início da corrida LRc01. Para todos os casos simulados, *k-box* e *k-min*, foi utilizada a mesma quantidade de janelas de 32s e de 512s utilizada na corrida LRc01 para o CCD1. São 49 janelas de 32s e 146 de 512s. Usando-se a equação $d = (2l)/\sqrt{\pi k}$, obtêm-se $d = 330$ e $d = 191$, respectivamente.

As duas primeiras colunas são referentes às medidas realizadas nas posições reais das janelas de fundo de céu para a corrida LRc01; as duas colunas seguintes mostram a média e o desvio padrão para as janelas alocadas pelo método *k-box* e posteriormente movidas para um local possível utilizando a imagem máscara, como explicado anteriormente e; por fim, as duas últimas colunas se referem às medidas obtidas na imagem completa com as janelas alocadas pelo *k-min*. Neste caso, para as janelas de 32s foi utilizado $d_{min} = 200$ e para as de 512s $d_{min} = 110$, menores que $d = 330$ e $d = 191$ calculados acima. Os valores médios das janelas obtidos com *k-box* e *k-min* são menores que os valores das janelas do método atual, significando que *k-box* e *k-min* alocaram janelas em posições livres de pixels brilhantes e estrelas. Não foi utilizada nenhuma métrica para medir o quanto as janelas estão uniformemente distribuídas, mas em trabalhos futuros poderia ser feito um histograma das distâncias das janelas às suas vizinhas mais próximas para se verificar a distribuição. A mesma sugestão feita anteriormente para trabalhos futuros no *k-box* também vale para o *k-min*, com relação aos pixels brilhantes. As Figuras 35b e 36b mostram um pedaço da imagem completa com as janelas de fundo de céu alocadas pelo método *k-min*.

Tabela 2 - Medidas na imagem completa, referentes às janelas do CCD1

Medidas	Medida 32s posições reais	Medida 512s posições reais	Medida 32s posições <i>k-box</i>	Medida 512s posições <i>k-box</i>	Medida 32s posições <i>k-min</i>	Medida 512s posições <i>k-min</i>
Média	445,47251	444,245685	444,980978	429,333198	431,621246	437,93358
Desvio	14,590079	16,401448	13,693262	70,791443	10,3658602	10,619474

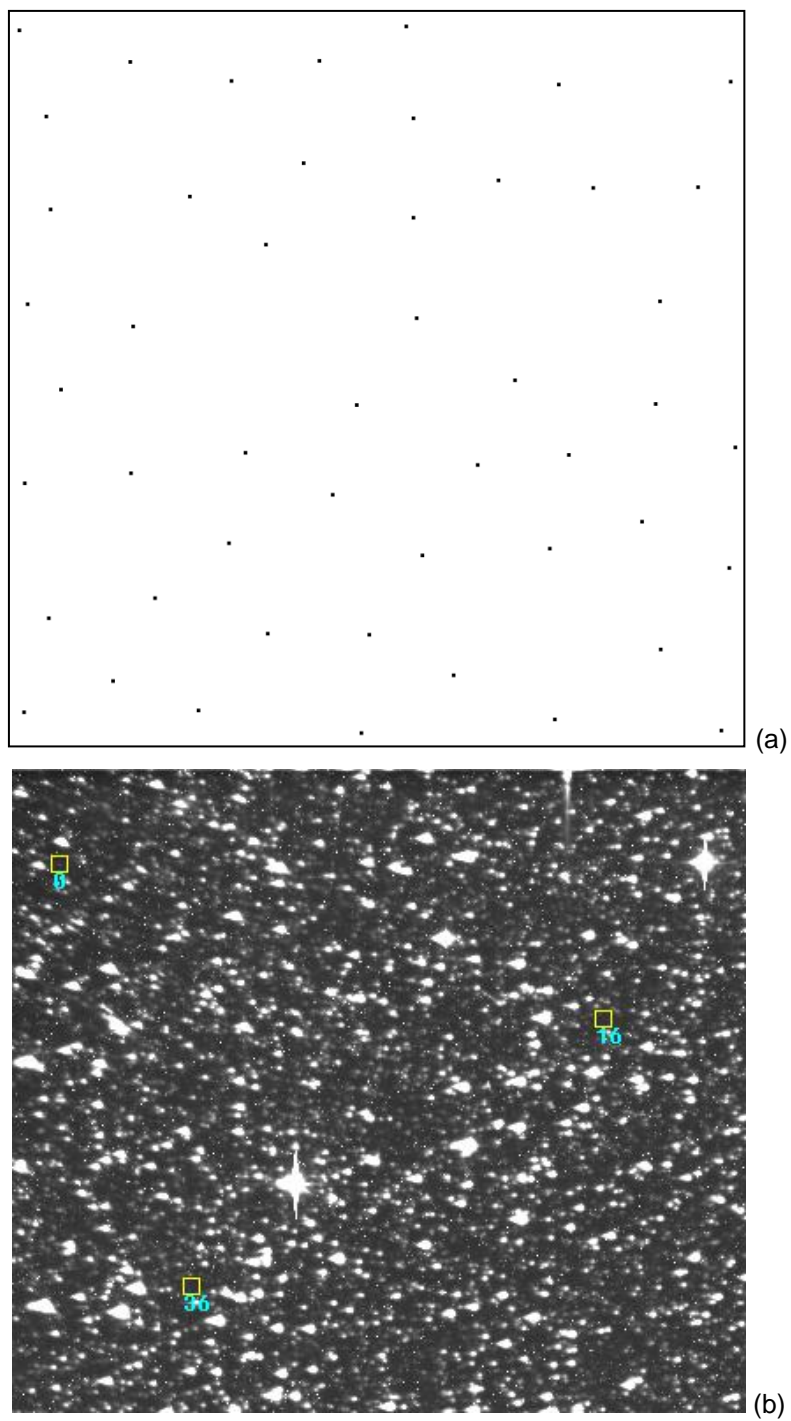


Figura 35 – (a) Alocação de janelas pelo método k -min. Foram alocadas 49 janelas (como no CCD1 da corrida LRc01 para janelas de 32s) com d_{min} de 250 pixels. (b) Peçaço da imagem completa com algumas janelas alocadas pelo k -min

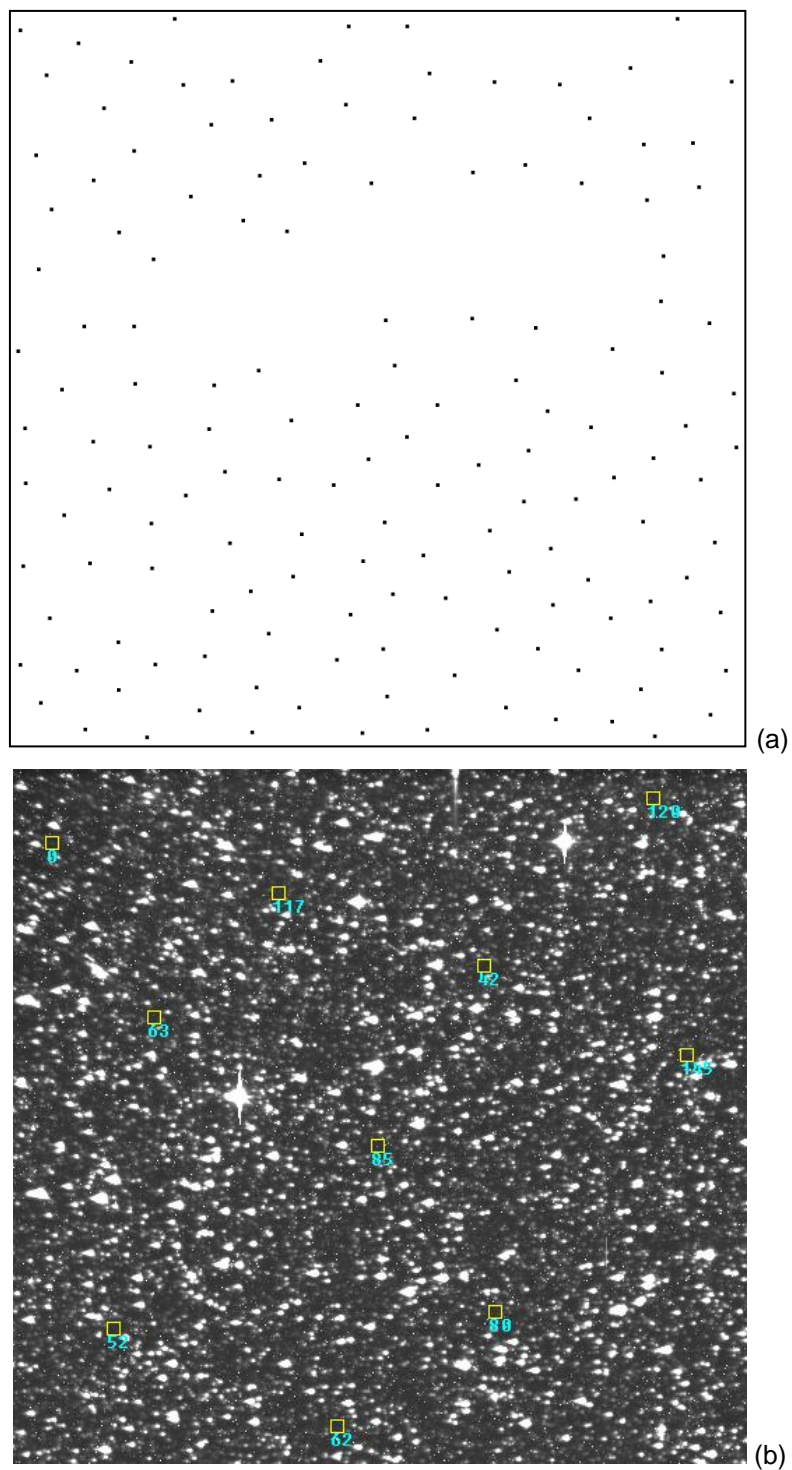


Figura 36 – (a) Alocação de janelas pelo método k -min. Foram alocadas 146 janelas (como no CCD1 da corrida LRc01 para janelas de 512s) com d_{min} de 120 pixels. (b) Pedaco da imagem completa com algumas janelas alocadas pelo k -min

4.5 *Discussão e conclusão sobre o capítulo*

O método *k-box* seria bom se, após a alocação inicial, não fosse necessário mover as janelas para os pontos livres de estrelas e pixels brilhantes. O ideal seria que o método alocasse janelas minimizando a distância entre estrelas alvos e janelas, já considerando a máscara (que indica quais são os pontos livres de estrelas e pixels brilhantes). Este problema ainda não possui uma solução.

O método *k-min* foi desenvolvido após os testes com o método *k-box* apontarem os seus defeitos. No método *k-min*, deve-se definir adequadamente a distância mínima entre as janelas, posto que este valor afeta diretamente a distribuição homogênea das janelas e a alocação das janelas em regiões da imagem que realmente representam o fundo de céu.

Numa versão aprimorada do método *k-min*, além das sugestões já mencionadas para trabalhos futuros, deve-se considerar a existência de pixels frios no CCD que geram valores baixos na imagem completa. Isto pode levar o método a considerar como fundo de céu um pixel que na realidade não o é. Este problema pode ser contornado marcando todas as posições de janelas que contém os pixels frios antes de ordená-las (ou inseri-las na fila de prioridades). Isto fará com que nenhuma janela contenha pixels frios.

5 Métodos de estimação de ruído de fundo e céu

Neste capítulo serão apresentados alguns métodos de estimação de ruído de fundo de céu. É importante observar a dificuldade existente em se testar os métodos aqui apresentados, tanto os de estimação de fundo de céu como os de alocação das janelas de fundo de céu (descritos no Capítulo 4). A dificuldade existe em função da disponibilidade dos dados, pois foram disponibilizadas para este trabalho as imagens completas de fundo de céu adquiridas no início de cada corrida e as séries temporais das janelas de fundo de céu obtidas durante as corridas (ou seja, valores de elétrons/pixel obtidos a cada 32 ou 512 segundos nas janelas de fundo de céu). Sendo assim, os testes serão realizados de duas maneiras: na imagem completa, para verificar se a alocação das janelas é válida (também no Capítulo 4) e com os dados das séries temporais, para a validação dos métodos de estimação de ruído de fundo de céu.

Foram disponibilizadas oito séries temporais da corrida LRc01, sendo quatro séries das janelas amostradas a 32 segundos e quatro séries das janelas amostradas a 512 segundos. Destas quatro séries, tanto de 32 quanto de 512 segundos, há duas séries para cada CCD, por exemplo: das séries temporais de 32 segundos, há duas para o CCD1 e duas para o CCD2, sendo uma do dia 16 de maio ao dia 21 de maio de 2007 e a outra do dia 21 de maio ao dia 30 de maio de 2007.

Da corrida IRa01, foram disponibilizadas quatro séries temporais, duas de 512 segundos e duas de 32 segundos, sendo duas de cada CCD.

De ambas as corridas foram disponibilizadas quatro imagens completas de fundo de céu para cada CCD, obtidas antes do início da aquisição das séries temporais. Aqui foi utilizada a média das quatro imagens de fundo de céu de cada CCD para os testes apresentados a seguir.

A seguir, a Tabela 3 e a Tabela 4 resumem os dados que foram utilizados nos testes.

Tabela 3 - Descrição das séries temporais utilizadas neste trabalho

Corrida	Descrição	Data	Qtd. Amostras	Qtd. Janelas
LRc01	32s CCD1 A	16 de maio de 2007 à 21 de maio de 2007	13408	49
LRc01	32s CCD1 B	21 de maio de 2007 à 30 de maio de 2007	25870	49
LRc01	32s CCD2 A	16 de maio de 2007 à 21 de maio de 2007	13408	49
LRc01	32s CCD2 B	21 de maio de 2007 à 30 de maio de 2007	25867	49
LRc01	512s CCD1 A	16 de maio de 2007 à 21 de maio de 2007	838	146
LRc01	512s CCD1 B	21 de maio de 2007 à 30 de maio de 2007	1619	146
LRc01	512s CCD2 A	16 de maio de 2007 à 21 de maio de 2007	839	145
LRc01	512s CCD2 B	21 de maio de 2007 à 30 de maio de 2007	1618	145
IRa01	32s CCD1	10 de fevereiro de 2007 à 28 de fevereiro de 2007	51243	52
IRa01	32s CCD2	10 de fevereiro de 2007 à 28 de fevereiro de 2007	51239	52
IRa01	512s CCD1	10 de fevereiro de 2007 à 28 de fevereiro de 2007	3139	148
IRa01	512s CCD2	10 de fevereiro de 2007 à 28 de fevereiro de 2007	3202	147

Tabela 4 - Descrição das imagens completas utilizadas neste trabalho

Corrida	Descrição	Data	Tempo de integração
LRc01	Imagem 1 CCD1	13 de maio de 2007	64 × 32s
LRc01	Imagem 2 CCD1	13 de maio de 2007	64 × 32s
LRc01	Imagem 3 CCD1	13 de maio de 2007	64 × 32s
LRc01	Imagem 4 CCD1	14 de maio de 2007	64 × 32s
LRc01	Imagem 1 CCD2	13 de maio de 2007	64 × 32s
LRc01	Imagem 2 CCD2	13 de maio de 2007	64 × 32s
LRc01	Imagem 3 CCD2	13 de maio de 2007	64 × 32s
LRc01	Imagem 4 CCD2	14 de maio de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 1 CCD1	31 de janeiro de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 2 CCD1	31 de janeiro de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 3 CCD1	02 de fevereiro de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 4 CCD1	02 de fevereiro de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 1 CCD2	31 de janeiro de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 2 CCD2	31 de janeiro de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 3 CCD2	02 de fevereiro de 2007	64 × 32s
IRa01	Imagem 4 CCD2	02 de fevereiro de 2007	64 × 32s

5.1 Detalhamento do problema

Como já se sabe, para calcular acuradamente o fluxo luminoso de uma estrela, é preciso subtrair o seu ruído de fundo de céu. Sabe-se também que dependendo da aplicação, a estimação de ruído de fundo de céu pode ser absoluta ou relativa. A estimação absoluta contempla o valor absoluto do ruído de fundo de céu, incluindo sua componente contínua, também dita componente DC. Na estimação relativa, estimam-se apenas as variações no tempo do ruído de fundo de céu, em outras palavras, somente é estimada a componente dita AC.

O problema a ser estudado é como estimar o ruído de fundo de céu de cada uma das estrelas alvos observadas pelo CoRoT em cada instante de tempo, tendo como dados os fluxos luminosos das janelas de fundo de céu e as imagens completas, como descrito anteriormente.

5.2 Características das séries temporais

Para que seja possível propor e testar métodos de estimação de ruído de fundo de céu, é necessário saber como o fundo de céu se comporta espacial e temporalmente. Com o intuito de visualizar o comportamento das séries temporais, tanto espacial como temporalmente, foi gerado o gráfico a seguir.

Para a geração do gráfico de distribuição espacial da Figura 37, utilizou-se o método de interpolação vizinho mais próximo do *software* Matlab, as posições reais das janelas de fundo de céu da corrida LRc01 e os valores médios de elétrons/pixel de cada série temporal de cada janela de fundo de céu.

Observando-se o gráfico, nota-se uma considerável variação espacial para os valores médios de elétrons/pixel lidos em cada janela de fundo de céu. Apesar disso, há certa coerência espacial dos valores médios: de um modo geral, os valores mais altos ficam no fundo e os valores menores ficam à frente. Esta coerência espacial permite utilizar interpolações que levam em conta as janelas espacialmente próximas. Mais adiante, será mostrado que a variação espacial das janelas de fundo de céu é maior que a variação temporal.

Já a Figura 38 a seguir, mostra os dados das séries temporais das janelas de 32 segundos do CCD1 da corrida IRa01 “plotados” como uma imagem, onde o eixo x é o tempo e o eixo y corresponde às janelas de fundo de céu, sem nenhuma ordenação espacial. O nível de cinza corresponde ao fluxo luminoso, ou seja, quanto mais claro, maior o valor de elétrons/pixel obtido naquele instante. Estão representadas 52 janelas de 32s (52 linhas) com 51243 amostras cada uma (51243 colunas).

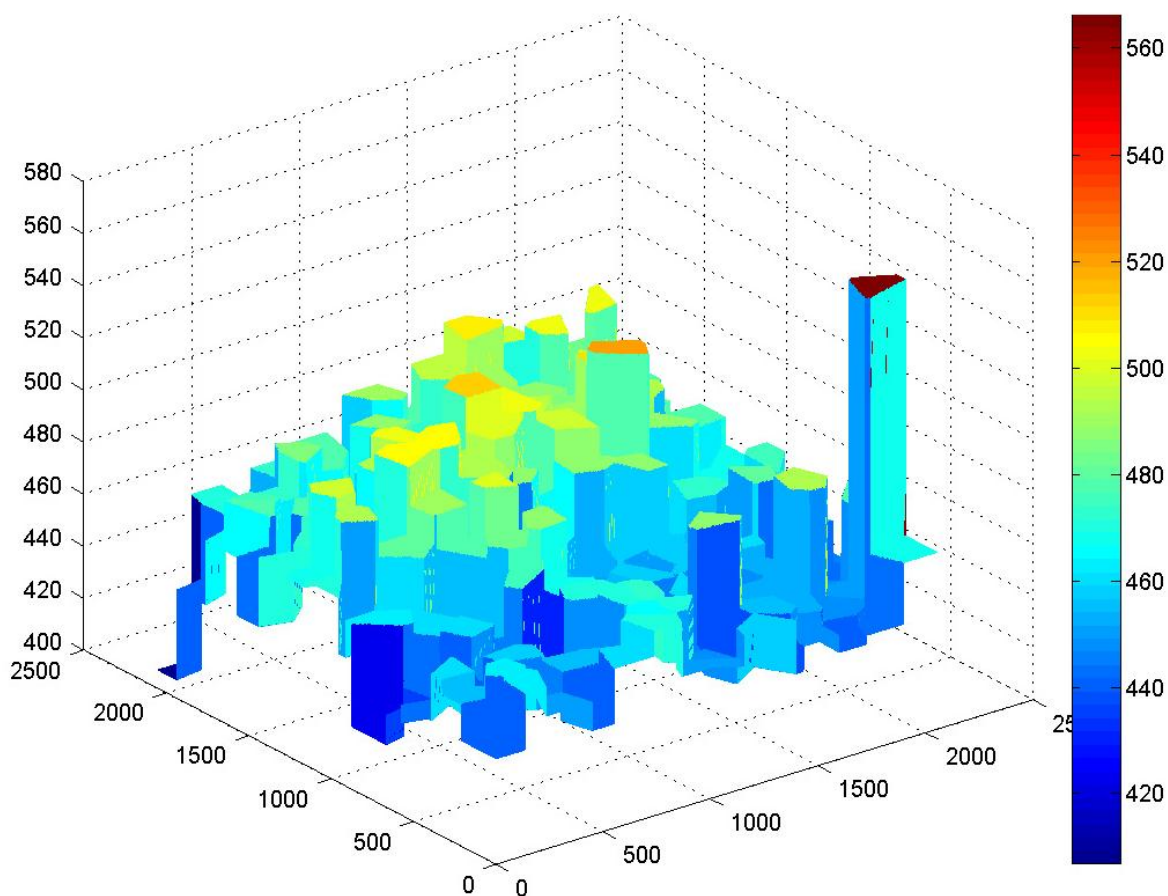


Figura 37 - Interpolação *Nearest Neighbor* do Matlab

A Figura 39 mostra uma ampliação de uma parte da Figura 38, onde se pode observar com maior nitidez que algumas janelas repentinamente se tornam mais claras, provavelmente devido aos impactos de partículas. Também se observam várias “estrias” verticais, que fazem com que todas as janelas fiquem mais claras ou mais escuras.

Já a Figura 40 mostra em detalhe uma série temporal de fundo de céu a passagem pela AMAS, um possível *outlier* e a variação que ocorre nas leituras em função da passagem pela zona clara e escura (iluminada e não iluminada pelo Sol). Observar que a Figura 40 é referente à corrida LRC01.

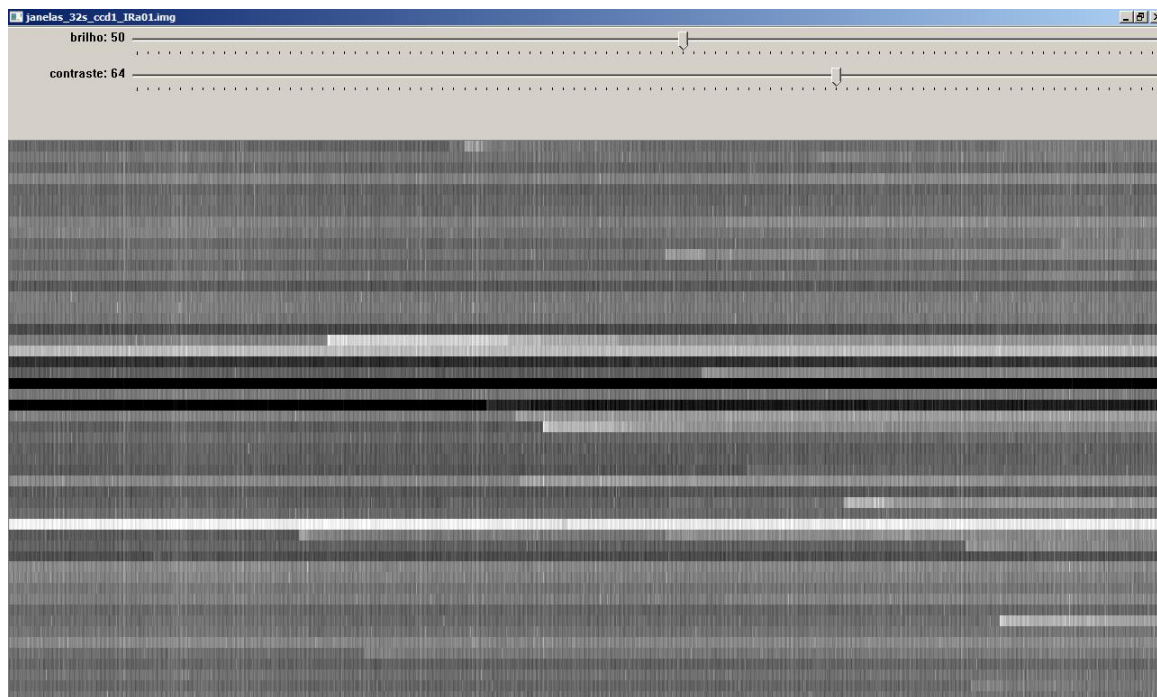


Figura 38 - Janelas de 32s CCD1 IRa01 representadas como imagem

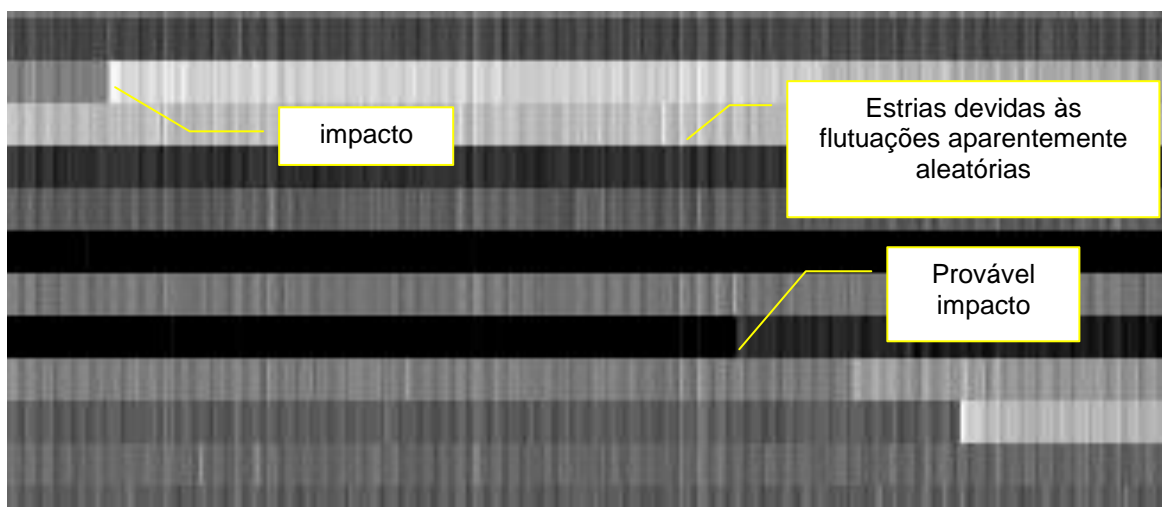


Figura 39 - Detalhamento do comportamento das séries temporais

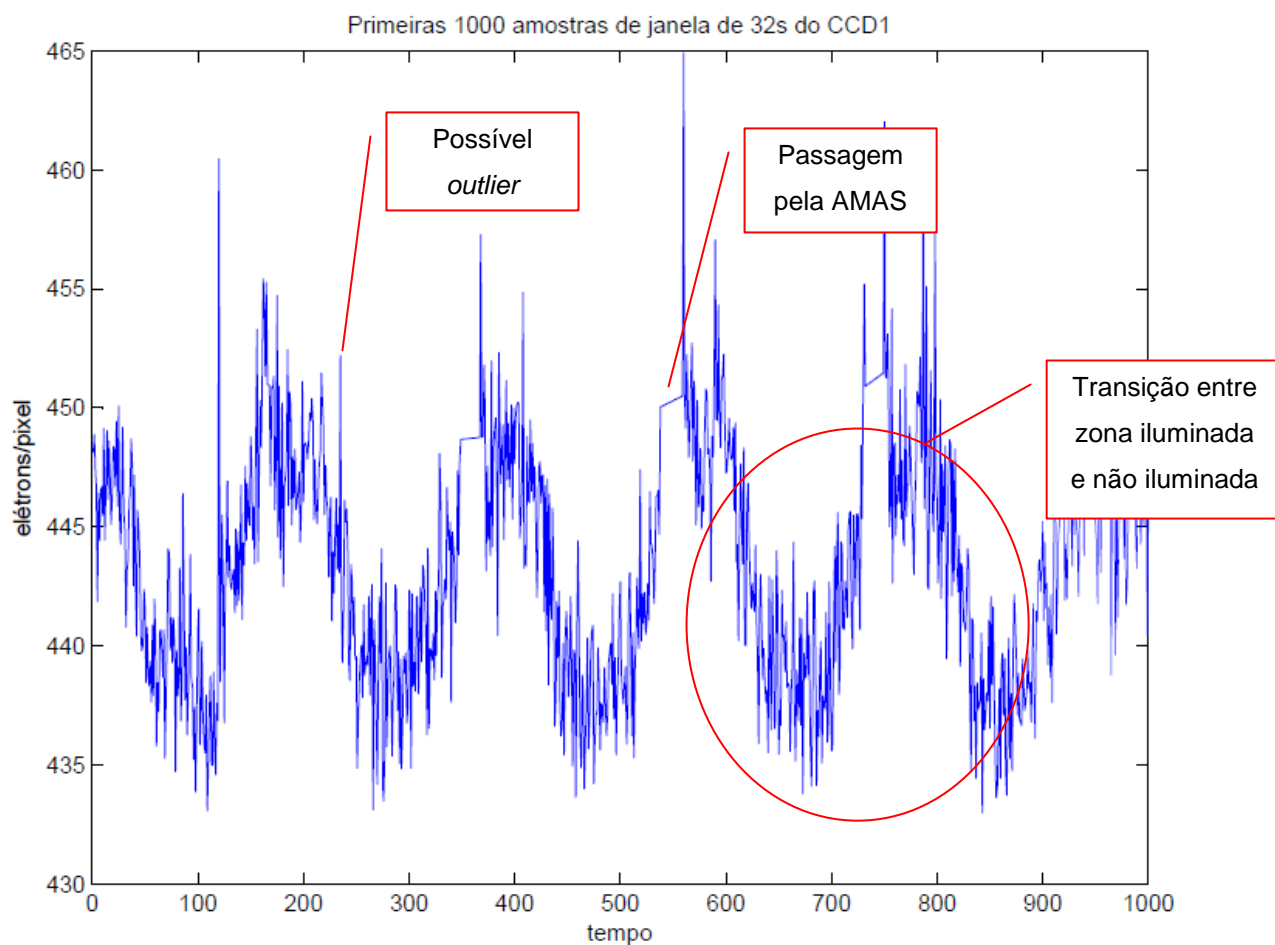


Figura 40 - Primeiras 100 amostras de janela de 32s do CCD1(LRC01) (dados N1, com correções) onde se enfatiza a passagem pela AMAS, efeitos de *outliers* e a passagem pela zona iluminada pelo Sol e pela não iluminada

Nas Figuras 41 e 42 a seguir, o mesmo é mostrado para as janelas de 512 segundos do CCD1 da corrida IRa01. Os valores mínimo e máximo são, respectivamente, 323,980988 e 455,865204. São 148 janelas (linhas) de 3139 amostras cada (colunas).

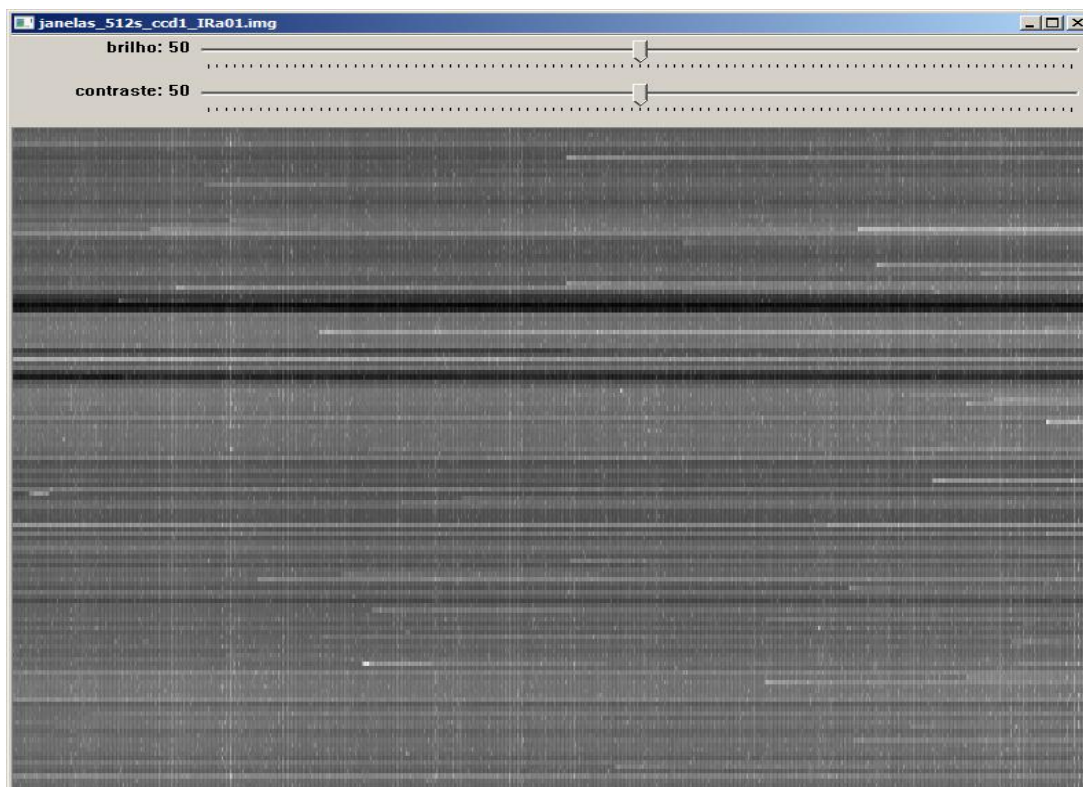


Figura 41 - Janelas de 512s CCD1 IRa01 representadas como imagem

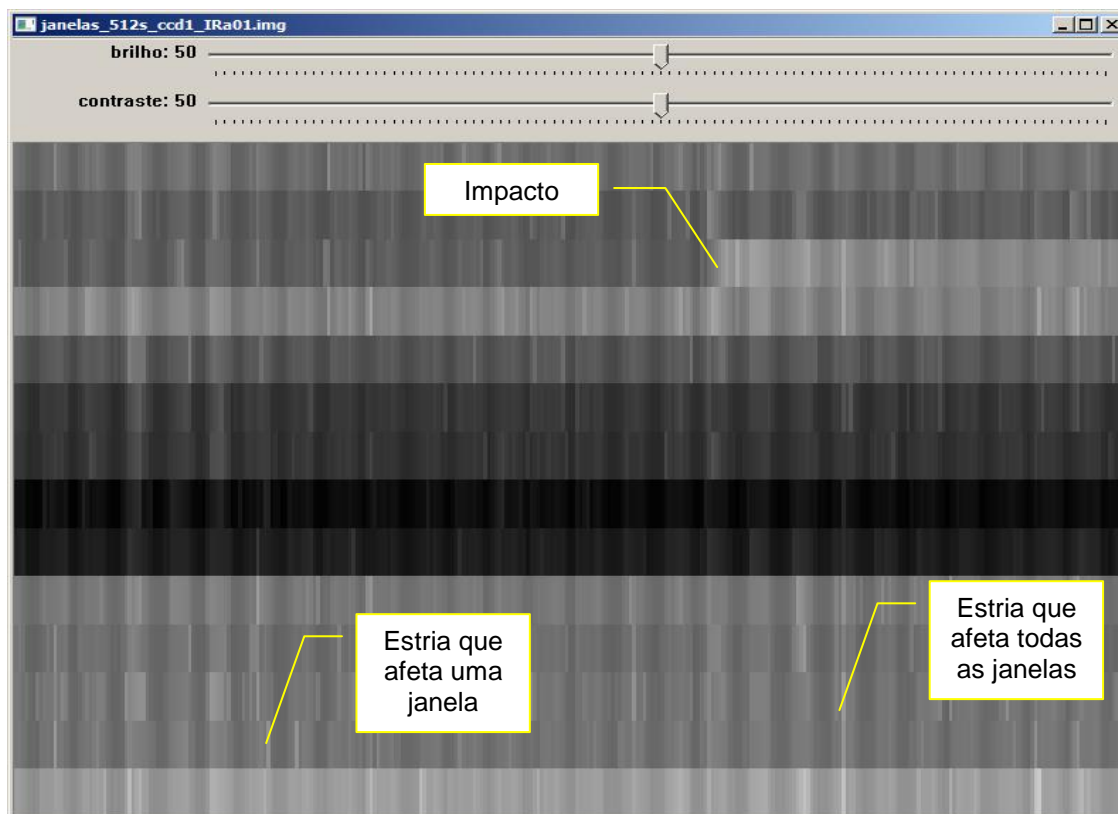


Figura 42 - Detalhamento do comportamento das séries temporais

Daqui em diante as séries temporais serão descritas como uma matriz $F_{m \times n}$, onde as m linhas são as janelas de fundo de céu e as n colunas são os tempos.

$$F = \begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & \dots & f_{0,n-1} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & \dots & f_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m-1,0} & f_{m-1,1} & \dots & f_{m-1,n-1} \end{bmatrix}$$

Uma das verificações que foram feitas foi se os fluxos das janelas variam mais espacial ou temporalmente, como citado anteriormente. Para tal, calcularam-se as médias marginais da matriz F .

$$\left[\begin{array}{cccc|c} f_{0,0} & f_{0,1} & \dots & f_{0,n-1} & l_0 \\ f_{1,0} & & & f_{1,n-1} & l_1 \\ \dots & & f_{i,j} & \dots & \\ f_{m-1,0} & f_{m-1,1} & & f_{m-1,n-1} & l_m \\ \hline c_0 & c_1 & & c_n & \end{array} \right]$$

Onde l_i é a média da linha i e c_j é a média da coluna j . Calculou-se então o desvio padrão dos $\{l_i\}$ e $\{c_j\}$, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 5, que mostram facilmente que a variação espacial é bem maior que a temporal.

Tabela 5 - Desvio padrão

Dados	Desvio padrão das linhas (variação espacial)	Desvio padrão das colunas (variação temporal)
LRc01 32s CCD1 A	18,472163	4,196392
LRc01 32s CCD2 A	25,534794	4,190676
LRc01 512s CCD1 A	20,824066	4,320603
LRc01 512s CCD2 A	24,138573	4,084957
LRc01 32s CCD1 B	18,361927	4,385653
LRc01 32s CCD2 B	25,030201	4,329960
LRc01 512s CCD1 B	19,666504	4,264338
LRc01 512s CCD2 B	23,140612	4,291688
IRa01 32s CCD1	13,731436	3,654300
IRa01 32s CCD2	10,203147	3,387733
IRa01 512s CCD1	9,887424	3,800112
IRa01 512s CCD2	13,065314	3,566912

5.3 Métodos de estimação estudados

Para o estudo dos métodos de estimação de ruído de fundo de céu, partiu-se da hipótese de que seria possível propor um método que apresentasse erros menores do que os erros apresentados pelos métodos testados por Drummond (2007). Os métodos testados pela citada autora foram reproduzidos e a partir deles foram propostos os novos métodos.

A seguir, descrevemos os métodos de estimação de ruído de fundo de céu estudados. Para tal, considerou-se que se desconhece uma linha l da matriz de fluxo luminoso F por vez e tentou-se estimá-la a partir dos dados das outras linhas da matriz de séries temporais F . Calculou-se a diferença média entre os elementos estimados para a linha l e os valores verdadeiros da linha l , supostamente desconhecidos. A métrica da diferença pode ser o erro absoluto médio (MAE¹⁸) ou a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE¹⁹).

Os algoritmos descritos em seguida foram todos implementados em C++, com o uso da biblioteca ProEikon²⁰.

5.3.1 Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas no instante t

Este método de estimação utiliza $m - 1$ das m séries temporais de janelas de fundo de céu. A partir das $m - 1$ séries, estima-se a série supostamente desconhecida calculando a mediana das $m - 1$ séries restantes em cada instante de tempo t , como ilustrado na Figura 43 a seguir.

¹⁸ $MAE = \frac{|a_1 - b_1| + \dots + |a_n - b_n|}{n}$

¹⁹ $RMSE = \sqrt{\frac{(a_1 - b_1)^2 + \dots + (a_n - b_n)^2}{n}}$

²⁰ Disponível em: <http://www.lps.usp.br/~hae/software>

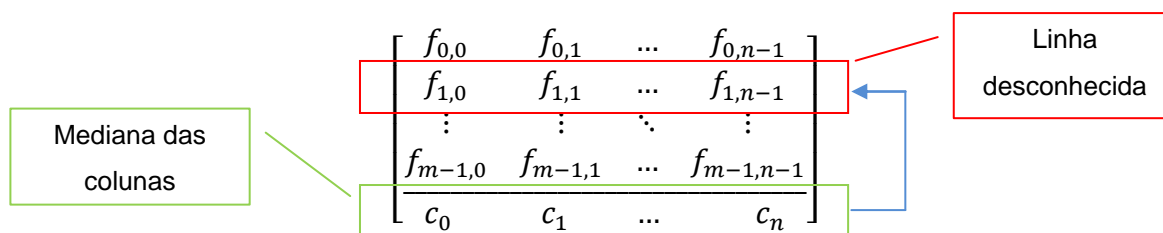


Figura 43 - Estimação da linha desconhecida pela mediana das demais séries temporais em dado instante de tempo. As linhas representam as janelas, ou seja, cada uma das séries temporais, e as colunas representam os valores de elétrons/pixel lidos em cada instante de tempo

Foram realizados testes com este método e, a seguir, estão apresentados em forma de tabela, os erros absoluto (MAE) e quadrático (RMSE) obtidos entre a linha desconhecida e a mediana das $m - 1$ linhas restantes.

Tabela 6 - Erros absoluto e quadrático da estimacão da linha desconhecida pela mediana das janelas

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	16,022271	19,718803
LRc01 32s CCD1 B	15,604799	19,272044
LRc01 32s CCD2 A	21,120459	26,381024
LRc01 32s CCD2 B	20,356105	25,446071
Média	18,2759085	22,7044855
Desvio padrão	2,865448945	3,729574642
LRc01 512s CCD1 A	16,716024	21,490413
LRc01 512s CCD1 B	16,117389	20,506643
LRc01 512s CCD2 A	19,804288	24,933254
LRc01 512s CCD2 B	19,037252	23,612476
Média	17,91873825	22,6356965
Desvio padrão	1,779302443	2,00644061

5.3.2 Estimacão da linha desconhecida pela média das janelas no instante t

Este método é análogo ao anterior, porém utiliza a média das séries temporais, e não mais a mediana.

Tabela 7 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela média das janelas

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	15,888176	19,25902
LRc01 32s CCD1 B	15,520165	18,849228
LRc01 32s CCD2 A	21,051733	26,329232
LRc01 32s CCD2 B	20,328652	25,565077
Média	18,1971815	22,50063925
Desvio padrão	2,897674614	3,995405722
LRc01 512s CCD1 A	2,8977	3,9954
LRc01 512s CCD1 B	16,668693	21,407945
LRc01 512s CCD2 A	16,123341	20,426669
LRc01 512s CCD2 B	19,798518	24,83997
Média	13,872063	17,667496
Desvio padrão	7,493305993	9,30903838

5.3.3 Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos mais próximos no instante t

Este método de estimação utiliza τ das m séries temporais de janelas de fundo de céu, onde τ é o número de janelas vizinhas mais próximas da janela representada pela linha desconhecida. A partir das τ séries, estima-se a linha desconhecida calculando-se a média das τ séries em cada instante de tempo t , como ilustrado na Figura 44 a seguir. Para o caso de $\tau = 1$, a linha desconhecida será igual à série temporal da janela espacialmente mais próxima dela.

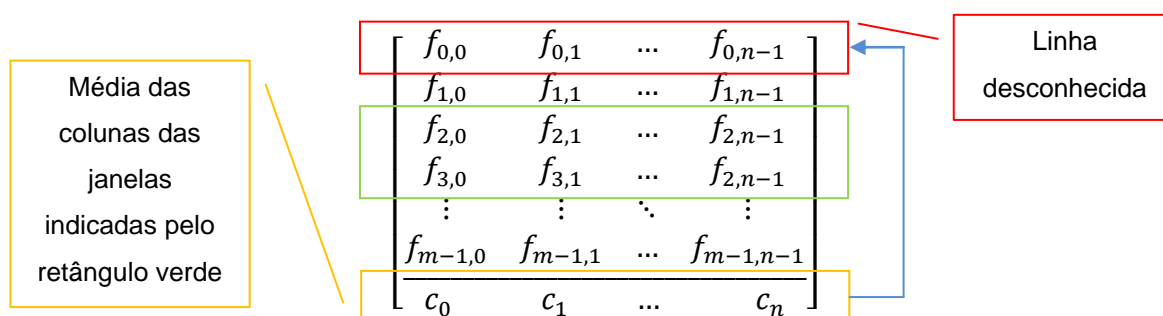


Figura 44 - Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos. Na figura está ilustrada a estimação da linha desconhecida a partir da média dos dois vizinhos espacialmente mais próximos, indicados pelo retângulo verde, da janela referente à linha desconhecida

Foram realizados testes deste método e a seguir estão as tabelas com resultados dos testes com um vizinho mais próximo e com a média dos cinco vizinhos mais próximos.

Tabela 8 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela janela vizinha mais próxima

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	15,152416	19,236434
LRc01 32s CCD1 B	15,238506	18,700226
LRc01 32s CCD2 A	21,05734	26,113026
LRc01 32s CCD2 B	19,88622	23,678017
Média	17,8336205	21,93192575
Desvio padrão	3,083775227	3,570247097
LRc01 512s CCD1 A	16,528652	22,368866
LRc01 512s CCD1 B	14,873702	19,820227
LRc01 512s CCD2 A	17,308799	24,105465
LRc01 512s CCD2 B	16,045817	22,554062
Média	16,1892425	22,212155
Desvio padrão	1,019775015	1,774579861

Tabela 9 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pelas cinco janelas vizinhas mais próximas

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	11,073826	14,011559
LRc01 32s CCD1 B	10,848848	13,583268
LRc01 32s CCD2 A	15,318593	20,632157
LRc01 32s CCD2 B	14,676789	19,684454
Média	12,979514	16,9778595
Desvio padrão	2,346871489	3,696923681
LRc01 512s CCD1 A	13,426392	18,307376
LRc01 512s CCD1 B	12,327274	16,650484
LRc01 512s CCD2 A	13,468038	18,533928
LRc01 512s CCD2 B	12,696629	17,027542
Média	12,97958325	17,6298325
Desvio padrão	0,560891126	0,930650525

5.3.4 Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos mais próximos espacialmente e pelos vizinhos temporais anteriores

Este método de estimação é análogo ao anterior, porém também utiliza os vizinhos temporais anteriores para a estimação do valor de fundo de céu no instante t .

Assim como o método anterior, este utiliza τ das N séries temporais de janelas de fundo de céu, onde τ é o número de janelas vizinhas mais próximas da janela representada pela linha desconhecida. A partir das τ séries, estima-se a linha desconhecida calculando-se a média dos valores obtidos nos ν instante de tempo anteriores ao atual das τ séries de tempo vizinhas mais próximas da linha desconhecida.

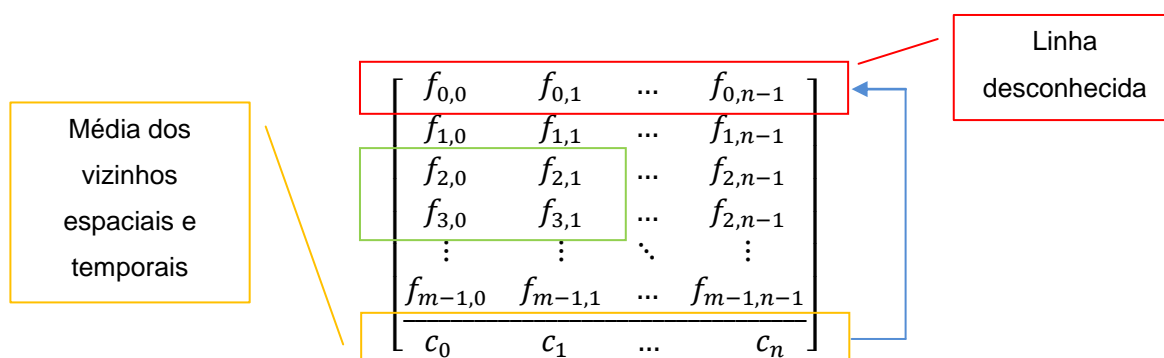


Figura 45 - Estimação da linha desconhecida pelos vizinhos espaciais e temporais. Na figura está ilustrada a estimativa da linha desconhecida a partir da média dos dois vizinhos espacialmente mais próximos da janela referente à linha desconhecida, considerando-se para o cálculo apenas uma quantidade ν de vizinhos temporais, como indicado pelo retângulo verde

Apresentamos a seguir os resultados obtidos utilizando cinco janelas espacialmente mais próximas da janela e três vizinhas temporais anteriores.

Tabela 10 – Erros absoluto e quadrático da estimativa da linha desconhecida pelos 5 vizinhos mais próximos e 3 temporais

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	11,060605	13,99205
LRc01 32s CCD1 B	10,834202	13,565628
LRc01 32s CCD2 A	15,304425	20,618007
LRc01 32s CCD2 B	14,664279	19,671114
Média	12,96587775	16,96169975
Desvio padrão	2,347159688	3,69962301
LRc01 512s CCD1 A	13,619753	18,532438
LRc01 512s CCD1 B	12,524563	16,892742
LRc01 512s CCD2 A	13,694722	18,755165
LRc01 512s CCD2 B	12,940388	17,269566
Média	13,1948565	17,63915767
Desvio padrão	0,561085302	0,984684395

5.3.5 Método de estimação de ruído de fundo de céu estrela-box

Tal método possibilita a estimação de ruído de fundo de céu, estimando o fundo de céu diretamente em cada estrela observada. Outra utilidade para este método seria para testes comparativos, já que é bastante complicado testar se as novas posições de janelas de fundo de céu propostas são razoáveis, pois não há como realmente alocá-las e obter as leituras reais. A ideia era comparar os valores estimados em cada uma das estrelas alvos observadas pelo CoRoT com os valores medidos na imagem completa nas diferentes posições de janelas: posições originais, geradas pelo *k-box* e geradas pelo *k-min*.

Este método proposto pelo Dr. Fábio de Oliveira Fialho²¹, consiste em estimar o valor de fundo de céu em cada estrela alvo observada, a partir da imagem completa de céu obtida no início de cada corrida.

O método é bastante simples e consiste em alocar uma janela de tamanho 50×50 pixels ao redor da estrela alvo (sendo a estrela o centro da janela), obter os valores dos pixels nesta janela, ordená-los e então considerar que o fundo de céu na estrela em questão é o valor da mediana do vetor ordenado de valores dos pixels.

A Figura 46 mostra o gráfico dos pixels ordenados de uma janela em torno de uma estrela alvo. Os pixels que se concentram à direita pertencem à estrela ou podem corresponder a pixels impactados. Já os pixels que se concentram à esquerda podem ser pixels defeituosos. Considera-se que o patamar central do gráfico corresponda ao fundo de céu.

²¹ Correspondência via e-mail sobre o presente trabalho com o Dr. Fábio de Oliveira Fialho, em 20 de junho de 2011.

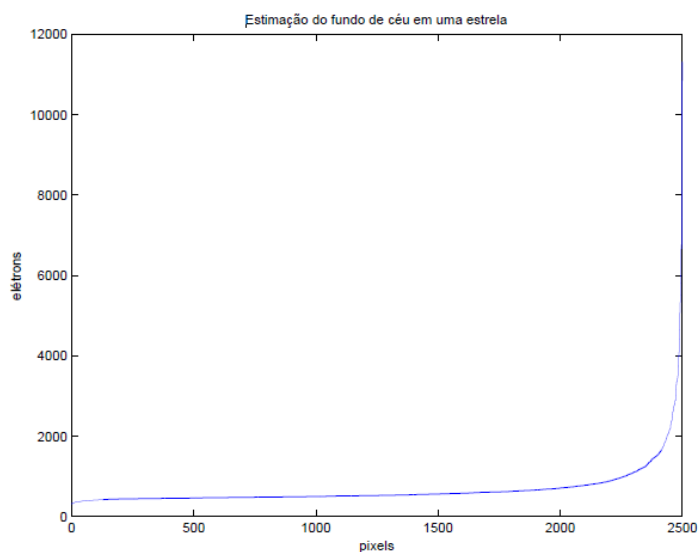


Figura 46 - Pixels lidos na janela e ordenados

O primeiro problema encontrado na utilização deste método foi que se notou um erro sistemático nas estimativas de fundo de céu das estrelas. Todos os valores estimados parecem estar ligeiramente acima dos valores esperados, posto que se esperava estimar valores bastante próximos aos valores lidos na imagem completa com a posição atual das janelas de fundo de céu (posições da LRC01). A Tabela 11 mostra os valores médios e os desvios padrões das estimativas de fundo de céu nas estrelas pelo método *estrela-box* em comparação com a mediana das janelas de fundo de céu na imagem completa, o erro sistemático fica evidente diante da diferença dos valores.

Tabela 11 - Estimação de fundo de céu nas estrelas pelo método *estrela-box*, *estrela-box – 75 pixels* e média das janelas de fundo de céu

Fundo de céu	Estrelas 32s <i>estrela-box</i>	Estrelas 32s <i>estrela-box-75 pixels</i>	Janelas 32s	Estrelas 512s <i>estrela-box</i>	Estrelas 512s <i>estrela-box-75 pixels</i>	Janelas 512s
Média	497,1570845	469,1146096	445,4725714	495,8480101	467,8055352	444,2456849
Desvio padrão	34,27634183	20,52174858	14,59007294	35,17941127	21,42481802	16,40144873

Tal método de estimação de fundo de céu nas estrelas não é utilizado pelo CoRoT pois não há banda suficiente para enviar para solo a quantidade necessária de dados para realizar a estimação desta maneira.

Como uma possível solução para o erro sistemático notado no método anteriormente descrito, tentou-se uma modificação no método que consiste em desprezar os últimos 75 pixels do vetor ordenado, pois em média, uma máscara de estrela tem 75 pixels. Assim, de certa maneira, a estrela não estaria sendo considerada na estimação do fundo de céu. Porém, a modificação também não foi considerada boa o bastante, pois não se soube estimar com exatidão a quantidade de pixels do vetor ordenado que deveria ser desprezada para a estimação do fundo de céu para que o erro sistemático fosse diminuído.

Um possível teste futuro é desprezar quantidades diferentes de pixels para cada estrela, levando em consideração o tamanho da máscara utilizada em cada estrela para a obtenção de sua curva de luz. Este teste não foi implementado, fica como sugestão para trabalhos futuros.

5.3.6 Estimação da linha desconhecida pela imagem completa

Este método utiliza a média das quatro imagens completas obtidas no início de cada corrida. A linha desconhecida é estimada como um valor constante obtido através da contagem de elétrons/pixel na janela de fundo de céu correspondente na imagem completa, como está ilustrado na Figura 47 a seguir.

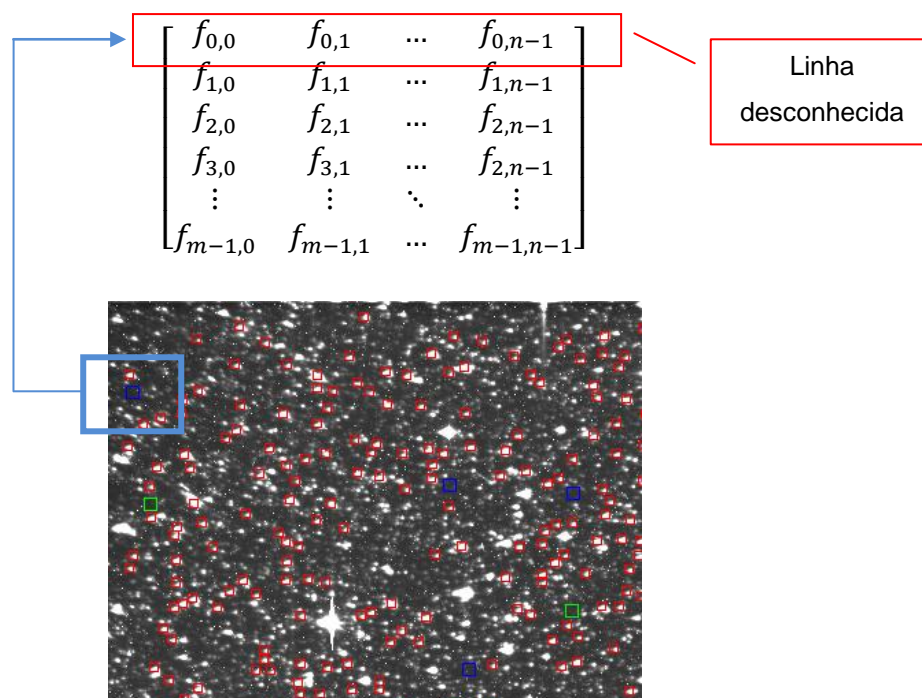


Figura 47 - Estimação da linha desconhecida pela imagem completa. O valor de elétrons/pixel obtido na janela indicada pelo retângulo azul será utilizado para estimar a linha desconhecida

A seguir os resultados dos testes utilizando o método descrito.

Tabela 12 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela imagem completa

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	15,518104	18,480706
LRc01 32s CCD1 B	18,864132	21,313543
LRc01 32s CCD2 A	10,442703	13,648671
LRc01 32s CCD2 B	9,428213	11,980603
Média	13,563288	16,35588075
Desvio padrão	4,425575243	4,30369366
LRc01 512s CCD1 A	17,707137	22,356947
LRc01 512s CCD1 B	20,772422	23,293582
LRc01 512s CCD2 A	9,709445	14,064314
LRc01 512s CCD2 B	8,830725	12,688704
Média	14,25493225	18,10088675
Desvio padrão	5,901380316	5,497386485

5.3.7 Estimação da linha desconhecida pela média dos τ vizinhos mais próximas seguida da correção de média da janela pela imagem completa

Este método é bastante similar ao de estimação de linha desconhecida pelos vizinhos mais próximos, descrito anteriormente. A diferença do método apresentado

nesta seção é que é realizada a correção de média da janela de fundo de céu pela leitura média de elétrons/pixel na imagem completa. De cada leitura $f_{m,n}$ realizada em uma das τ janelas vizinhas mais próximas da linha suposta como desconhecida, é subtraída a média da linha em questão, representada por l_m e somada a leitura realizada na imagem completa, chamada aqui de d_m , assim se tem $c_{l,m} = f_{m,n} - l_m + d_m$.

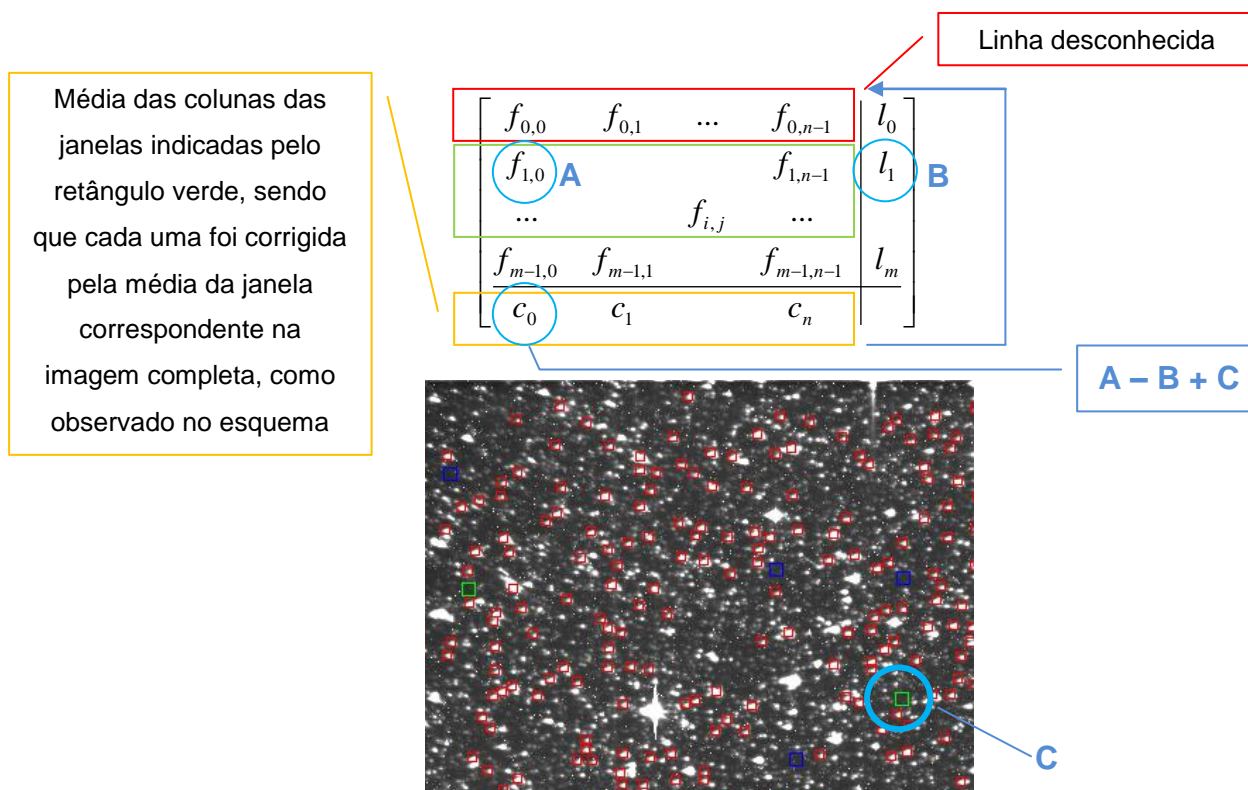


Figura 48 - Estimação da linha desconhecida pelas vizinhas mais próximas, seguida de correção de média pela imagem completa

É importante notar que, na aplicação real, deve-se estimar o ruído de fundo de céu nas estrelas (e não nas janelas como nos testes). A imagem completa não nos fornece diretamente o valor do ruído de fundo de céu nas estrelas, pois este ruído estará adicionado ao brilho da estrela. Porém, é possível estimar o ruído de fundo de céu numa estrela, como descrito na Seção 4.5 do Capítulo 4.

A seguir, na Tabela 13, os resultados obtidos com este método.

Tabela 13 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pelas vizinhas mais próximas e correção de média pela imagem completa

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	15,37373	18,147839
LRc01 32s CCD1 B	18,659978	20,910295
LRc01 32s CCD2 A	9,978368	13,191262
LRc01 32s CCD2 B	8,892206	11,303516
Média	13,2260705	15,888228
Desvio padrão	4,59962843	4,420415084
LRc01 512s CCD1 A	17,6312	22,00037
LRc01 512s CCD1 B	20,801222	23,043123
LRc01 512s CCD2 A	9,215294	13,68654
LRc01 512s CCD2 B	8,191019	12,059254
Média	13,95968375	17,69732175
Desvio padrão	6,220219833	5,626366307

5.3.8 Estimação da linha desconhecida pela média das janelas seguida da correção de média da janela pela imagem completa

Este método é análogo ao anterior, porém não se consideram apenas as janelas vizinhas mais próximas da linha tida como desconhecida e sim a média de todas as $N - 1$ janelas disponíveis. A seguir, alguns resultados obtidos com este método.

Tabela 14 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela média das janelas e correção de média pela imagem completa

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	15,339526	18,02331
LRc01 32s CCD1 B	18,631195	20,868239
LRc01 32s CCD2 A	9,826222	13,032303
LRc01 32s CCD2 B	8,809467	11,196146
Média	13,1516025	15,7799995
Desvio padrão	4,644898254	4,452870691
LRc01 512s CCD1 A	17,601184	21,942488
LRc01 512s CCD1 B	20,733481	22,908683
LRc01 512s CCD2 A	8,999193	13,473863
LRc01 512s CCD2 B	8,081395	11,949816
Média	13,85381325	17,5687125
Desvio padrão	6,278555198	5,656411918

5.3.9 Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas seguida da correção de média da janela pela imagem completa

Este método substitui a média do método anterior pela mediana de todas as $N - 1$ janelas disponíveis. A seguir, alguns resultados obtidos com este método.

Tabela 15 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas e correção de média pela imagem completa

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	15,357691	18,079566
LRc01 32s CCD1 B	18,655403	20,906056
LRc01 32s CCD2 A	9,98114	13,15347
LRc01 32s CCD2 B	8,856362	11,25427
Média	13,212649	15,8483405
Desvio padrão	4,605962192	4,431954576
LRc01 512s CCD1 A	17,60478	21,956098
LRc01 512s CCD1 B	20,733331	22,91456
LRc01 512s CCD2 A	9,032849	13,493533
LRc01 512s CCD2 B	8,106606	11,973121
Média	13,8693915	17,584328
Desvio padrão	6,262817065	5,64930656

5.3.10 Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas seguida da correção de média da linha pela média das medianas das k janelas mais próximas

O nome deste método ficou bastante confuso e para ter um nome mais curto, será chamado de “mediana e k vizinhos”. Este método primeiro estima a linha desconhecida pela mediana das janelas naquele instante, exatamente como foi feito na Seção 5.3.1. Depois, calcula as k janelas espacialmente mais próximas da janela com valor supostamente desconhecido. Estima-se o nível DC dessas k janelas calculando as medianas das respectivas k séries temporais. Em seguida, tira a média aritmética das k janelas. Esta média será a estimativa do nível DC da linha desconhecida. Finalmente, corrige o nível DC da linha supostamente desconhecida pela estimativa do nível DC. O esquema a seguir procura ilustrar o método.

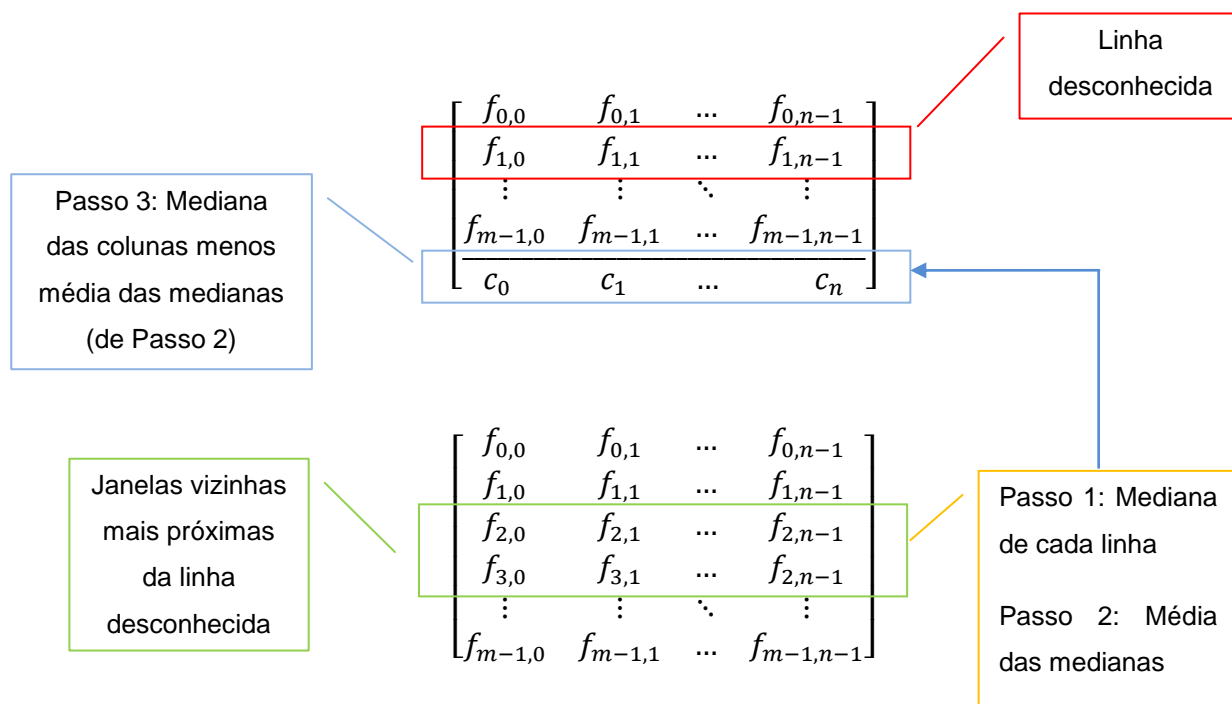


Figura 49 - Estimação da linha desconhecida pela mediana das janelas seguida da correção de média da linha pela média das medianas das k janelas mais próximas

A Tabela 16 apresenta os resultados dos testes com o método em questão para $k = 5$ vizinhos.

Tabela 16 - Erros absoluto e quadrático da estimação da linha desconhecida pela mediana e 5 vizinhos

Dados	MAE	RMSE
LRc01 32s CCD1 A	11,022242	13,883745
LRc01 32s CCD1 B	10,814923	13,557046
LRc01 32s CCD2 A	15,204594	20,579551
LRc01 32s CCD2 B	14,612060	19,653119
Média	12,91345475	16,91836525
Desvio padrão	2,31769282	3,71441096
LRc01 512s CCD1 A	13,341227	18,195619
LRc01 512s CCD1 B	12,278797	16,545390
LRc01 512s CCD2 A	13,340080	18,391128
LRc01 512s CCD2 B	12,603087	16,975550
Média	12,89079775	17,52692175
Desvio padrão	0,53605455	0,905800537

5.4 Resumos dos resultados dos testes realizados

A seguir, o resumo dos testes realizados com os métodos aqui apresentados. As tabelas a seguir apresentam resultados de testes com a corrida LRc01 e também com a corrida IRa01, sendo que estão resumidos os resultados dos testes já apresentados neste capítulo e também testes adicionais que não foram detalhados.

Tabela 17 - Resumo dos resultados para LRc01, 32s

Métodos	Dados	Média MAE	Média RMSE
Mediana	32s	18,2759085	22,7044855
Média	32s	18,1971815	22,50063925
1 vizinho	32s	17,8336205	21,93192575
2 vizinhos	32s	13,8686435	17,94483525
3 vizinhos	32s	13,99509675	18,08048625
4 vizinhos	32s	13,4421665	17,2101205
5 vizinhos	32s	12,979514	16,9778595
6 vizinhos	32s	13,498009	17,551441
7 vizinhos	32s	13,798316	17,94476875
5 vizinhos espaciais e 3 temporais	32s	12,96587775	16,96169975
5 vizinhos espaciais e 5 temporais	32s	12,97628875	16,973727
Imagem completa	32s	13,563288	16,35588075
5 vizinhos e imagem completa	32s	13,2260705	15,888228
Média e imagem completa	32s	13,1516025	15,7799995
Mediana e imagem completa	32s	13,212649	15,8483405
Mediana e 5 vizinhos	32s	12,91345475	16,91836525

Tabela 18 - Resumo dos resultados para LRc01, 512s

Métodos	Dados	Média MAE	Média RMSE
Mediana	512s	17,91873825	22,6356965
Média	512s	13,872063	17,667496
1 vizinho	512s	16,1892425	22,212155
2 vizinhos	512s	14,16488775	18,85141375
3 vizinhos	512s	13,5201025	18,18295575
4 vizinhos	512s	13,34134725	17,9785915
5 vizinhos	512s	12,97958325	17,6298325
6 vizinhos	512s	13,12323525	17,89217425
7 vizinhos	512s	12,933471	17,7543735
5 vizinhos espaciais e 3 temporais	512s	13,1948565	17,63915767
5 vizinhos espaciais e 5 temporais	512s	13,33485625	18,018071
Imagem completa	512s	14,25493225	18,10088675
5 vizinhos e imagem completa	512s	13,95968375	17,69732175
Média e imagem completa	512s	13,85381325	17,5687125
Mediana e imagem completa	512s	13,8693915	17,584328
Mediana e 5 vizinhos	512s	12,89079775	17,52692175

Tabela 19 - Resumo dos resultados para LRc01, 32s (apenas as 800 primeiras amostras de cada série temporal)

Métodos	Dados	Média MAE	Média RMSE
Mediana	32s	17,78736825	22,14737275
Média	32s	17,74585425	22,014693
1 vizinho	32s	17,54465275	21,300298
2 vizinhos	32s	14,09851275	18,407382
3 vizinhos	32s	13,7405425	17,61657475
4 vizinhos	32s	13,11435775	16,87541225
5 vizinhos	32s	12,62637	16,55884525
6 vizinhos	32s	13,147362	17,21714775
7 vizinhos	32s	13,4516105	17,63288075
5 vizinhos espaciais e 3 temporais	32s	12,60059725	16,5294985
5 vizinhos espaciais e 5 temporais	32s	12,60235025	16,5316025
Imagem completa	32s	13,94625625	16,3634055
5 vizinhos e imagem completa	32s	13,514454	15,7540655
Média e imagem completa	32s	13,47702748	15,700688
Mediana e imagem completa	32s	13,5071835	15,745506
Mediana e 5 vizinhos	32s	12,605739	16,54433

Tabela 20 - Resumo dos resultados para LRc01, 512s (apenas as 800 primeiras amostras de cada série temporal)

Métodos	Dados	Média MAE	Média RMSE
Mediana	512s	17,7793855	22,4865785
Média	512s	17,76785975	22,394287
1 vizinho	512s	16,00754425	22,02662425
2 vizinhos	512s	14,0705415	18,710276
3 vizinhos	512s	13,4399665	18,02034875
4 vizinhos	512s	13,23699175	17,81246425
5 vizinhos	512s	12,914194	17,490219
6 vizinhos	512s	13,0461195	17,7245665
7 vizinhos	512s	12,99955467	17,604244
5 vizinhos espaciais e 3 temporais	512s	13,15491225	17,7540855
5 vizinhos espaciais e 5 temporais	512s	13,2951205	17,91348625
Imagem completa	512s	14,449314	18,25627825
5 vizinhos e imagem completa	512s	14,09786925	17,7965265
Média e imagem completa	512s	14,023714	17,69221125
Mediana e imagem completa	512s	14,035121	17,7066835
Mediana e 5 vizinhos	512s	12,861369	17,451668

Tabela 21 - Resumo dos resultados para IRa01, 32s

Métodos	Dados	Média MAE	Média RMSE
Mediana	32s	8,697233	12,5888825
Média	32s	8,700987	12,6561545
1 vizinho	32s	9,9575855	13,602296
2 vizinhos	32s	8,927598	12,2394005
3 vizinhos	32s	8,7046945	12,12418
4 vizinhos	32s	8,5161635	12,079469
5 vizinhos	32s	8,319106	11,8459465
6 vizinhos	32s	8,1839785	11,749257
7 vizinhos	32s	8,4008245	11,9602515
5 vizinhos espaciais e 3 temporais	32s	8,3071905	11,833531
5 vizinhos espaciais e 5 temporais	32s	8,3211255	11,8459805
Imagem completa	32s	11,916657	15,6148525
5 vizinhos e imagem completa	32s	11,709505	15,2838155
Média e imagem completa	32s	11,6642795	15,229716
Mediana e imagem completa	32s	11,674738	15,243424
Mediana e 5 vizinhos	32s	8,226213	11,76979

Tabela 22 - Resumo dos resultados para IRa01, 512s

Métodos	Dados	Média MAE	Média RMSE
Mediana	512s	7,506536	10,183261
Média	512s	7,554978	10,099775
1 vizinho	512s	7,6070505	10,3742255
2 vizinhos	512s	6,714329	9,104051
3 vizinhos	512s	6,375339	8,6544225
4 vizinhos	512s	6,3053035	8,584713
5 vizinhos	512s	6,1839065	8,4500695
6 vizinhos	512s	6,156345	8,4525065
7 vizinhos	512s	6,2124475	8,60574
5 vizinhos espaciais e 3 temporais	512s	6,5743685	8,836688
5 vizinhos espaciais e 5 temporais	512s	6,8021785	9,0735745
Imagem completa	512s	9,933766	11,8430725
5 vizinhos e imagem completa	512s	9,710381	11,3579365
Média e imagem completa	512s	9,672055	11,2478375
Mediana e imagem completa	512s	6,027947	8,275258

5.5 *Discussão sobre o capítulo*

Nas tabelas de resumos, marcou-se em tom mais claro o menor erro (MAE e RMSE) de cada série temporal tanto da corrida LRc01 e da IRa01. O método com os menores erros foi, em quase todos os testes, o chamado de “mediana e 5 vizinhos”. Mesmo no caso em que o método “mediana e 5 vizinhos” não gerou os menores erros (IRa01 32s), gerou erros bem próximos do mínimo.

Em todos os casos, o erro do método “mediana e 5 vizinhos” foi menor que os erros do método da mediana, atualmente utilizado pelo CoRoT. Para estimar o valor absoluto do ruído de fundo de céu, usar o método da “mediana e 5 vizinhos” seria claramente melhor do que usar o método da mediana. “Mediana e 5 vizinhos” leva em consideração a variação tanto espacial como temporal do ruído, enquanto que o método da mediana leva em consideração somente a variação temporal do ruído. Já foi visto que o ruído de fundo varia mais espacial do que temporalmente e que o método da mediana despreza o componente mais importante (o espacial).

Certamente existem várias aplicações onde é importante estimar o valor absoluto do ruído de fundo. Porém, no caso específico da missão CoRoT, só interessa estimar a variação temporal de ruído de fundo de céu. A missão calcula a DFT (*Discrete Fourier Transform*) do fluxo luminoso e analisa o seu espectro. Assim, a estimação de fundo deve corrigir a variação temporal que pode alterar o espectro. O valor absoluto altera somente o componente DC, que afeta apenas a raia de frequência zero. Para estimar o valor relativo do ruído de fundo de céu, utilizar o método da “mediana e 5 vizinhos” é exatamente equivalente a usar o método da mediana. O método “mediana e 5 vizinhos” apenas corrige o nível DC das séries temporais de cada janela, sem afetar em nada as raias de DFT diferentes de frequência zero.

Intuitivamente, o método da “mediana e imagem completa” deveria gerar erros menores que o método da “mediana e 5 vizinhos”. Pois, para corrigir o nível DC de uma janela, o método “mediana e imagem completa” está usando o nível DC da imagem completa na posição exata da janela, enquanto que o “mediana e 5 vizinhos” está usando o nível DC estimado pela mediana das séries temporais de 5 janelas mais próximas da janela correspondente à linha considerada desconhecida.

6 Discussão final

Discussões detalhadas sobre a alocação das janelas de fundo de céu e sobre a estimação de ruído de fundo de céu foram feitas no Capítulo 4 e no Capítulo 5, respectivamente. Este Capítulo apresentará uma discussão final sobre o trabalho, a conclusão e detalhes sobre onde este trabalho foi publicado.

Como já visto, o método *k-box* para a alocação das janelas de fundo de céu é intuitivamente o mais indicado, pois aparentemente, imagina-se que a janela de fundo de céu mais próxima de uma estrela alvo seja ideal para representar o fundo de céu desta estrela. Porém, a dificuldade de validar o método, a grande variação espacial do fundo de céu e a dificuldade em implementar uma versão onde não seja necessário mover as janelas após sua alocação inicial fazem com que o método *k-min* seja, no momento, o método mais indicado. Sendo que *k-min* também pode ser aperfeiçoado, analisando-se a distribuição das janelas e os valores de fundo de céu lidos nelas, com o intuito de definir a distância mínima ideal entre duas janelas de maneira a garantir a distribuição homogênea de janelas e a representatividade do fundo de céu.

É evidente que o método de estimação de ruído de fundo de céu a ser eleito tem total relação com o método de alocação das janelas de fundo de céu, sendo que um ponto negativo da abordagem atualmente utilizada pelo CoRoT é que ela não leva em conta o impacto da escolha do método de estimação de fundo de céu na determinação das janelas de fundo de céu. Se decidir utilizar o método da janela mais próxima para estimar o fundo do céu, a alocação das mesmas deve ser feita de modo a minimizar a maior distância entre uma estrela e a sua janela mais próxima, o que foi inicialmente pensando neste trabalho. Porém, além das dificuldades já explicadas encontradas com *k-box*, de acordo com a metodologia de testes adotada para a determinação de um bom método de estimação de ruído de fundo de céu nas estrelas, o método elegido por apresentar menor erro foi o chamado “mediana e 5 vizinhos” e não o método da janela vizinha mais próxima.

Diante dos fatos, é válida a recomendação de *k-min* e “mediana e 5 vizinhos”, pois *k-min* aloca as janelas de maneira relativamente homogênea e nos pontos de mínimo

da imagem completa, teoricamente tentando garantir uma boa representação do fundo de céu. Já “mediana e 5 vizinhos” utiliza a mediana de todas as janelas de fundo de céu, que necessitam estar alocadas de maneira representativa de todo o fundo de céu, e corrige o nível DC das séries temporais.

6.1 Conclusão

A hipótese inicial de que a utilização do método da janela mais próxima seria a melhor opção não foi o que se constatou ao final dos testes realizados.

Ambos os algoritmos de alocação de janelas descritos neste trabalho podem e devem ser aperfeiçoados, mas também é necessário se definir uma maneira confiável e tangível de se validar estes métodos. Diante dos resultados obtidos, recomenda-se fortemente a utilização do *k-min* para a alocação das janelas de fundo de céu.

Recomenda-se também a utilização do método “mediana e 5 vizinhas” para a estimação do ruído de fundo de céu, porém, vale lembrar que este método corrige o nível DC das séries temporais de cada janela de fundo de céu, o que de fato não interessa à missão CoRoT, mas que certamente pode interessar a outros projetos.

6.2 Publicações

O presente trabalho foi apresentado pelo colega Dr. Fábio de Oliveira Fialho no *4th CoRoT Brazil Workshop*, em Natal-RN, em 2010, com o título de: *An alternative algorithm of background window placement applied to the CoRoT Mission*. Este trabalho também foi publicado nos Anais do XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT), em Curitiba-PR, em 2011, com o título de: Um algoritmo alternativo para a alocação de janelas de fundo de céu aplicado à missão CoRoT.

REFERÊNCIAS

AUVERGNE, M. **Environmental perturbations of the photometry.** The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 283-287, 2006.

AUVERGNE, M. et al. **The CoRoT Satellite in flight: Description and Performance.** Astronomy & Astrophysics, n. 506, p. 411-424, 2009.

BAGLIN, A. et al. **CoRoT: Description of the Mission and Early Results.** Transiting Planets – Proceedings IAU Symposium, n. 253, p. 71-81, 2008.

BAGLIN, A. et al. **Scientific objectives for a minisat: CoRoT.** The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 33-38, 2006.

BARGE, P. et al. **Photometric search for transiting planets.** The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 83-92, 2006.

BAUDIN, F. et al. **Everything you always wanted to know about CoRoT data.** The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 145-149, 2006.

BOISNARD, L.; AUVERGNE, M. **CoRoT mission engineering: cost-effective solutions for stellar photometry in low Earth orbit.** In: 55th Congress of the International Astronautical Federation (IAF), 2004.

BUEY, J.T. et al. **Calibration strategy for the COROT photometry**. The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 183-189, 2006.

DELEUIL, M. et al. **Complementary observations for the CoRoT exoplanet program**. The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 341-352, 2006.

DRUMMOND, R. **Calibration of the CoRoT space mission**. 2007. 152p. Tese (PhD) - Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Bélgica, 2007.

DRUMMOND, R. et al. **Correcting for background changes in CoRoT exoplanet data**. Astronomy & Astrophysics, v. 487, n. 3, p. 1209-1220, 2008.

FIALHO, F.O. et al. **Jitter correction algorithms for the CoRoT satellite mission: validation with test bench data and MOST on-orbit photometry**. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v. 119, 2007.

GILARD, O. et al. **CoRoT Satellite: Analysis of the In-Orbit CCD Dark Current Degradation**. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 57, p. 1644-1653, 2010.

HECKBERT, P. **Color image quantization for frame buffer display**. ACM SIGGRAPH Proceedings of the 9th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, v. 16, n. 3, p. 297 – 307, 1982.

HOWELL, S.B. **Two-dimensional aperture photometry - signal-to-noise ratio of point-source observations and optimal data-extraction techniques**. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v.101, p. 616-622, 1989.

IGUCHI, K. **Desenvolvimento de um algoritmo híbrido de fotometria estelar a partir de imagens do espaço**. 2010. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.

IGUCHI, K. et al. **Development of a hybrid algorithm for time resolved stellar photometry from space image**. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2011, Curitiba. Anais do XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2011.

JANOT-PACHECO, E. et al. **Brazil and the CoRoT mission**. The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 121-122, 2006.

KARIOTY, F. et al. **Processing of the On-Flight Full Frame Images**. The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 305-307, 2006.

LLEBARIA, A.; GUTTERMAN, P. **Building up photometric apertures for the exoplanet channel**. The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 293-304, 2006.

MAYOR, M.; QUELOZ, D. **A Jupiter-mass companion to a solar-type star**. Nature, v. 378, p. 355-359, 1995.

MICHEL, E. et al. **The seismology programme of CoRoT**. The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 39-50, 2006.

PINHEIRO DA SILVA, L. **Caractérisation instrumentale appliquée à la photométrie de très haute précision dans le cadre de la mission spatiale**

CoRoT. 2007. 123p. Tese (Doutorado) – Universidade de Toulouse III, Toulouse, França, 2007.

PINHEIRO DA SILVA, L.; LAPAYERE, V.; BERBARDI, P. **Photometric calibration.** The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 309-315, 2006.

REEGEN, P. et al. **Reduction of time-resolved space-based CCD photometry developed for MOST Fabry Imaging data.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v.367, n. 4, p. 1417-1431, 2006.

ROUAN, D. et al. **The Exosolar Planets Program of the CoRoT Satellite.** Earth, Moon and Planets, Paises Baixos, v. 81, n. 1, p. 79-82, 1998.

SABOIA, A.M.; MARQUES, G.C. **Anomalia Magnética do Atlântico Sul.** Universidade de Brasília – Instituto de Geociências. Disponível em: http://www.geocities.com/unibem_palmas/5_Anomalia_Magnetica_Atlantico_Sul.pdf. Acesso em: 01 nov 2011.

SAMADI, R. et al. **Extraction of the photometric information: corrections.** The CoRoT Mission. ESA Publications Division, ESA Spec. Publ. v. 1306, p. 317-325, 2006.

SEEDGEWICK, R. **Algorithms.** Addison Wesley, 1986.

WOLSZCZAN, A. **Confirmation of Earth mass planets orbiting the millisecond Pulsar PSR-B1257+12.** Science, v. 264, n. 5158, p. 538-542, 1994.

APÊNDICE A

Os programas em C++ e os *scripts* em Matlab utilizados neste trabalho estarão disponíveis no site do Prof. Dr. Hae Yong Kim, no endereço: <http://www.lps.usp.br/~hae/luciana>.

No site também estará disponível um documento tutorial com as explicações necessárias para a utilização dos programas e *scripts*.

Os dados do CoRoT utilizados para testes neste trabalho não serão disponibilizados no site, no entanto serão disponibilizados arquivos com dados fictícios.