



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.21.19.14-TDI

**ESTUDO DE DIFERENTES TÉCNICAS PARA O  
CÁLCULO DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL  
ABSOLUTO NA IONOSFERA EQUATORIAL E DE  
BAIXAS LATITUDES**

Carolina de Sousa do Carmo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Fábio Becker Guedes, e Paulo de Oliveira Camargo, aprovada em 02 de março de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QJNJHE>>

INPE  
São José dos Campos  
2018

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO  
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

**Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.21.19.14-TDI

**ESTUDO DE DIFERENTES TÉCNICAS PARA O  
CÁLCULO DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL  
ABSOLUTO NA IONOSFERA EQUATORIAL E DE  
BAIXAS LATITUDES**

Carolina de Sousa do Carmo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Fábio Becker Guedes, e Paulo de Oliveira Camargo, aprovada em 02 de março de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QJNJHE>>

INPE  
São José dos Campos  
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Carmo, Carolina de Sousa do.

C213e      Estudo de diferentes técnicas para o cálculo do conteúdo eletrônico total absoluto na ionosfera equatorial e de baixas latitudes / Carolina de Sousa do Carmo. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxvi + 119 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.21.19.14-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Fábio Becker Guedes, e Paulo de Oliveira Camargo.

1. Sistema de posicionamento global. 2. Conteúdo elétrico total. I.Título.

CDU 523.4-853

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Carolina de Sousa do Carmo**

Título: "ESTUDO DE DIFERENTES TÉCNICAS PARA O CÁLCULO DO CONTÉUDO ELETRÔNICO TOTAL ABSOLUTO NA IONOSFERA EQUATORIAL E DE BAIXAS LATITUDES".


Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre**

Dr. Alisson Dal Lago

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Fábio Becker Guedes

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Paulo de Oliveira Camargo

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / UNESP / Presidente Prudente - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dra. Patrícia Mara de Siqueira Negreti

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Junior

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UFPR / Curitiba - PR

Participação por Vídeo - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade



*“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importa quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos de uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.*

DALAI LAMA





*Em memória de **Gessy Maria**, minha querida avó.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a **Deus**, a minha família, minha mãe, **Angela Maria** e a meu Pai, **Plínio**, pela minha vida, pelo apoio e por nunca me deixarem faltar nada. A minha Irmã, **Camila** por todo o carinho.

Ao meu namorado **André Luiz** pela paciência, por acreditar no meu trabalho e sempre me apoiar no que faço.

Aos meus amigos de longa data, **Maria Eduarda, Karolina, Larissa, Hisashi, Thayene, Mariana, Jéssica** e **Lívia**, que mesmo estando longe sempre se fizeram presentes.

Aos meus amigos do INPE, em especial à **Laysa, Diego** e **Cosme**, por toda ajuda acadêmica e conselhos. Pelas amigas do INPE e também de moradia **Amanda** e **Karen**, pela amizade, e companheirismo.

Aos meus orientadores, **Drs. Fábio Becker-Guedes** e **Paulo de Oliveira Carmargo** pelo incentivo e orientação.

Agradeço ao **INPE**, pelos **pesquisadores** e **professores** que ajudaram na minha formação, e desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à **UNESP** que cedeu espaço no laboratório do **INCT**, para que eu pudesse fazer parte deste trabalho.

Por fim, agradeço ao **CNPq** pelo auxílio financeiro, que foi de bastante importância para a conclusão deste trabalho.



## RESUMO

O Conteúdo Eletrônico Total (do inglês “Total Electron Content” - TEC) da ionosfera pode ser calculado a partir da combinação linear livre da geometria utilizando as observações coletadas com receptores do Sistema de Posicionamento Global (do inglês “Global Positioning System” - GPS) localizados no solo. As observáveis GPS sofrem atrasos de propagação devido ao TEC, aos atrasos instrumentais (do inglês “biases”) e às reflexões múltiplas (multi-caminho) recebidas na antena. Como resultado do cálculo diferencial de fase e de grupo, os termos não dispersivos são cancelados, restando apenas os termos dos biases do receptor e do satélite na forma de um TEC inclinado (do inglês “Slant Total Electron Content” - STEC). O STEC corresponde a um arco de TEC para cada satélite medido por um determinado receptor em solo. Esse trabalho visa comparar três técnicas de cálculo do TEC e avaliar o seu desempenho para caracterizar a ionosfera no setor brasileiro. Para isso foi selecionado um período de mínima atividade solar, de novembro de 2008 a outubro de 2009; e um período de máxima atividade solar, de novembro de 2014 a outubro de 2015, onde observou-se a variabilidade sazonal do TEC e o seu comportamento durante um período perturbado (Tempestade de St. Patrick). Para a análise do período perturbado comparou-se também o modelo ionosférico NeQuick2, desenvolvido pelo ICTP (International Centre for Theoretical Physics). A fim de testar o desempenho do TEC obtido pelas técnicas selecionadas sob as condições específicas da ionosfera no setor brasileiro, utilizou-se uma estação na região equatorial, São Luís (SALU), e uma de baixa latitude compreendida na crista da Anomalia de Ionização Equatorial (do inglês “Equatorial Ionization Anomaly” - EIA), Cachoeira Paulista (CHPI). As técnicas utilizadas neste trabalho foram: a) a técnica desenvolvida por Yuichi Otsuka, e adaptada no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil, pelo Dr. João Francisco Galera Monico, para uso no programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace); b) a técnica desenvolvida por Gopi Seemala, no Boston College (BC); c) o método proposto por Ciruolo e colaboradores em 2006, no International Centre for Theoretical Physics (ICTP). Foram analisadas e comparadas as diferenças entre as técnicas estudadas nas regiões equatorial e de baixas latitudes, comparando-se também as diferenças apresentadas pelas variabilidades sazonais do TEC e conforme a atividade geomagnética e o ciclo solar. Neste trabalho também foi feito um teste de qualidade para duas técnicas (INPE e BC). O estudo realizado neste trabalho apresentou os seguintes resultados gerais: a) a diferença entre a técnica do INPE e as outras duas geralmente mostraram valores próximos a zero; b) foram observadas algumas diferenças pontuais de comportamento da curva do TEC no máximo solar, sendo que nestes casos os resultados da técnica do INPE foram corroborados por uma das outras duas técnicas. Realizou-se a média entre as três técnicas para se obter curvas representativas para o TEC para se observar a sua variabilidade diária na região brasileira. Porém, este estudo mostrou que o método utilizado pelo INPE é suficientemente adequado para descrever o TEC da ionosfera brasileira com as suas variações dia-a-dia, sazonais, espaciais, com o ciclo solar e em diferentes condições de atividade geomagnética.

Palavras-chave: Ionosfera, Sistema de Posicionamento Global, Conteúdo eletrônico Total.

# STUDY OF DIFFERENT TECHNIQUES FOR THE CALCULATION OF THE TOTAL ELECTRONIC CONTENT IN EQUATORIAL AND LOW LATITUDE IONOSPHERE

## ABSTRACT

The Total Electron Content (TEC) of the ionosphere can be calculated through parameters observed by GPS (Global Positioning System) receivers located on the ground. GPS observables suffer propagation delays due to TEC, instrumental delays (biases) and multiple reflections (multipath) received on the antenna. As a result of the differential phase and group calculation, the non-dispersive terms are canceled, leaving only the terms of the receiver and satellite biases in the form of a Slant Total Electron Content (STEC). The STEC corresponds to a TEC arc for each satellite measured by a given receiver on the ground. This work aims to compare three TEC calculation techniques and to evaluate their performance to characterize the ionosphere in the Brazilian sector. In order to do this a period of solar activity minimum, from November 2008 to October 2009, and a period of solar activity maximum, from November 2014 to October 2015, were selected. The TEC seasonal variability and variations of the electron content during a disturbed period (St. Patrick's Storm) were studied. The NeQuick2 ionospheric model, developed by ICTP (International Center for Theoretical Physics), was also compared for the disturbed period analysis. In order to test the performance of the TEC obtained by the selected techniques under the specific conditions of the ionosphere in the Brazilian sector, a station was selected in the equatorial region, São Luís (SALU), and another one at low-latitudes, under the crest of the Equatorial Ionization Anomaly (EIA), Cachoeira Paulista (CHPI). The techniques used in this work were: a) the technique developed by Yuichi Otsuka, and adapted by the National Institute for Space Research (INPE), Brazil, by Dr. João Francisco Galera Monico, to be used in the the Brazilian Space Weather Program (Embrace); b) the technique developed by Gopi Seemala, Boston College (BC); and c) the method proposed by Ciruolo et al. in 2006 at the International Center for Theoretical Physics (ICTP). Differences between the techniques studied in the equatorial and low latitude regions were analyzed, comparing the differences presented by the seasonal variability of the TEC and according to the geomagnetic activity and the solar cycle. In this work a quality test was also made for two techniques (INPE and BC). The study carried out in this work presented the following general results: a) the difference between the INPE technique and the other two techniques generally showed values close to zero; b) some specific differences in the behavior of the TEC curve during the solar maximum were observed, and in these cases the results of the INPE technique were corroborated by one of the other two techniques. The average between the three techniques was made to obtain representative TEC curves to observe its daily variability in the Brazilian region. However, this study shows that the method used by INPE is adequate enough to describe the TEC of the Brazilian ionosphere with its day-to-day, seasonal and spatial variations with the solar cycle, and in different conditions of geomagnetic activity.

Keywords: Ionosphere, Global Positioning System, Total Electron Content.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Perfil de densidade do plasma ionizado segundo as camadas. . . . .	9
2.2 Mecanismo de geração do campo elétrico zonal . . . . .	12
2.3 Instabilidade Rayleigh - Taylor . . . . .	13
2.4 Formação da Anomalia de Ionização Equatorial. . . . .	16
2.5 Diagrama esquemático do mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado. . . . .	19
3.1 Princípios básicos de posicionamento GPS. . . . .	22
3.2 Modulação do código sobre a onda portadora. . . . .	24
3.3 TEC vertical, apresentado geometricamente. . . . .	33
4.1 Ilustração mostrando as estações que serão utilizadas neste trabalho. . .	43
5.1 Índice Kp e SYM-H para o mês de março de 2015 . . . . .	47
5.2 Conteúdos eletrônico total vertical dos dias selecionados de março de 2015 para a estação de São Luís. A curva em azul representa o TEC médio de dias calmos (5, 10 e 14) e as curvas em verde representam o TEC vertical entre os dias 16 a 21. calculado para cada técnica estudada (INPE, BC e ICTP). . . . .	49
5.3 Conteúdos eletrônico total vertical dos dias selecionados de março de 2015 para a estação de Cachoeira Paulista. A curva em azul representa o TEC médio de dias calmos (5, 10 e 14) e as curvas em verde representam o TEC vertical entre os dias 16 a 21. calculado para cada técnica estudada (INPE, BC e ICTP). . . . .	50
5.4 Conteúdo eletrônico total vertical previsto pelo modelo NeQuick2 e calcu- lado pelas técnicas INPE, BC, ICTP, para três dias geomagneticamente calmos para o mês de março de 2015, para as estações de São Luís (SALU) e Cachoeira Paulista (CHPI). . . . .	51
5.5 Conteúdo eletrônico total vertical previsto pelo modelo NeQuick2 e cal- culado pelas técnicas INPE, BC, ICTP, para os três dias geomagneti- camente perturbados de março de 2015, para as estações de São Luís (SALU) e Cachoeira Paulista (CHPI). . . . .	52

5.6	Conteúdo eletrônico total vertical previsto pelo modelo NeQuick2 e calculado pelas técnicas INPE, BC, ICTP, para os três primeiros dias da fase de recuperação (19, 20 e 21) no mês de março de 2015, para as estações de São Luís (SALU) e Cachoeira Paulista (CHPI).	53
5.7	Correlação do modelo NeQuick com relação as técnicas para estação de São Luís e Cachoeira Paulista do dia 16 a 21 de março de 2015.	61
5.8	Diferença entre técnicas para os dias 5, 10 e 14, para as estações São Luís e Cachoeira Paulista.	63
5.9	Diferença percentual da Técnica do INPE com respeito as demais, para os dias 5, 10 e 14, para as estações São Luís e Cachoeira Paulista.	64
5.10	Diferença entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís.	67
5.11	Diferença percentual entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís	68
5.12	Diferença entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís.	71
5.13	Diferença percentual entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís.	72
5.14	Combinação das técnicas INPE, BC e ICTP, representado no gráfico pela média entre elas e seu desvio padrão (azul) e a técnica do INPE (vermelho), para os dias calmos 5, 10 e 14 de março de 2015, para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).	75
5.15	Combinação das técnicas INPE, BC e ICTP, representado no gráfico pela média entre elas e seu desvio padrão (azul) e a técnica do INPE (vermelho), para os dias perturbados 16, 17 e 18 de março de 2015, para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).	76
5.16	Combinação das técnicas INPE, BC e ICTP, representado no gráfico pela média entre elas e seu desvio padrão (azul) e a técnica do INPE (vermelho), para os dias da fase de recuperação 19, 20 e 21 de março de 2015, para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).	77
5.17	Teste de qualidade para os dias calmos 5, 10 e 14 de março de 2015, representado pelas técnicas INPE (verde) e BC (azul), para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).	79
5.18	Teste de qualidade para os dias perturbados 16, 17, e 18 de março de 2015, representado pelas técnicas INPE (verde) e BC (azul), para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).	80
5.19	Teste de qualidade para os dias da fase de recuperação 19, 20 e 21 de março de 2015, representado pelas técnicas INPE (verde) e BC (azul), para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).	81

5.20	Média horária do VTEC segundo as técnica INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	83
5.21	Desvio padrão da média segundo as técnica INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	85
5.22	Média horária do VTEC segundo as técnica INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	86
5.23	Desvio padrão da média segundo as técnica INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	88
5.24	Diferenças entre as técnicas referente à Figura 5.20 para São Luís, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP. A escala vertical escolhida é a mesma utilizada nas figuras do item 4.2.4 na análise das diferenças entre as técnicas no período de máxima atividade solar. . . . .	89
5.25	Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para São Luís. . . . .	92

5.26	Diferenças entre as técnicas referente à Figura 5.22 para Cachoeira Paulista, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP. A escala vertical escolhida é a mesma utilizada nas figuras do item 4.2.4 na análise das diferenças entre as técnicas no período de máxima atividade solar. . . . .	93
5.27	Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para Cachoeira Paulista. . . . .	96
5.28	Média horária do VTEC segundo as técnica INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	98
5.29	Desvio padrão da média segundo as técnica INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	99
5.30	Média horária do VTEC segundo as técnica INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	100
5.31	Desvio padrão da média segundo as técnica INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE. . . . .	101

5.32	Diferenças entre as técnicas referente à Figura 5.28 para São Luís, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP. . . . .	102
5.33	Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para São Luís. . . . .	104
5.34	Diferenças entre as técnicas referente à Figura 5.30 para Cachoeira Paulista, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP. . . . .	105
5.35	Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para Cachoeira Paulista. . . . .	107
5.36	Comparação das estações do ano para São Luís no ano de mínima e máxima atividade solar. Solstício de verão (curva vermelha), Equinócio de março (curva amarela), Solstício de inverno (curva azul) e Equinócio de setembro (curva verde). . . . .	108
5.37	Comparação das estações do ano para Cachoeira Paulista no ano de mínima e máxima atividade solar. Solstício de verão (curva vermelha), Equinócio de março (curva amarela), Solstício de inverno (curva azul) e Equinócio de setembro (curva verde). . . . .	109
5.38	Comparação das estações do ano para Cachoeira Paulista e São Luís entre os anos de mínima e máxima atividade solar, representado por São Luís no mínimo solar (lilas), Cachoeira Paulista ano de mínima atividade solar (rosa), São Luís ano de máxima atividade solar (azul), Cachoeira Paulista ano de máximo solar (vermelho). . . . .	111



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Freqüência das ondas portadoras. . . . .	22
3.2 Fontes e efeitos de erros GNSS. . . . .	25
5.1 Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick2, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 5, 10 e 14, para estação de São Luís. . . . .	54
5.2 Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 5, 10 e 14, para estação de Cachoeira Paulista. . . . .	56
5.3 Valores obtidos pela diferença entre o modelo e as técnicas para a estação de São Luís. . . . .	57
5.4 Valores obtidos pela diferença entre o modelo e as técnicas para a estação de Cachoeira Paulista. . . . .	58
5.5 Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick2, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 19, 20 e 21, para estação de São Luís. . . . .	59
5.6 Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick2, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 19, 20 e 21, para estação de Cachoeira Paulista. . . . .	60
5.7 Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 5, 10 e 14 de março de 2015, para a estação de São Luís. . . . .	65
5.8 Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 5, 10 e 14 de março de 2015, para a estação de Cachoeira Paulista. . . . .	66
5.9 Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de São Luís. . . . .	69
5.10 Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de Cachoeira Paulista. . . . .	70
5.11 Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 19, 20 e 21 de março de 2015, para a estação de São Luís. . . . .	73
5.12 Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 19, 20 e 21 de março de 2015, para a estação de Cachoeira Paulista. . . . .	74

5.13	Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de São Luís.	90
5.14	Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de Cachoeira Paulista. . . . .	94
5.15	Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de São Luís.	103
5.16	Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de Cachoeira Paulista. . . . .	106



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CME	–	do inglês “Coronal Mass Ejection”
DCB	–	do inglês “Differential code biases”
Embrace	–	Programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
EIA	–	do inglês “Equatorial Ionization Anomaly”
EUV	–	Extremo Ultravioleta
GNSS	–	do inglês “Global Navigation Satellite System”
GPS	–	do inglês “Global Positioning System”
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICTP	–	do inglês “International Centre for Theoretical Physics”
IGS	–	do inglês “International GNSS Service”
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LT	–	do inglês “Local Time”
MUF	–	do inglês “Maximum Usable Frequency”
PPEF	–	do inglês “Prompt Penetration Electric Field”
PRN	–	do inglês “Pseudorandom noise”
RINEX	–	do inglês “Receiver Independent Exchange Format”
RMSD	–	do inglês “Root Mean Square Deviation”
STEC	–	do inglês “Slant Total Electron Content”
TEC	–	do inglês “Total Electron Content”
TECU	–	do inglês “Total Electron Content Unit”
UT	–	do inglês “Universal Time”
UV	–	Ultravioleta
VTEC	–	do inglês “Vertical Total Electron Content”



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.1.1 Objetivo geral . . . . .	3
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	4
1.2 Justificativa para o desenvolvimento do trabalho . . . . .	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Camadas ionosféricas . . . . .	7
2.2 Processos de transporte . . . . .	9
2.3 Características relevantes na ionosfera equatorial e de baixas latitudes . . . . .	11
2.3.1 Pico pré-reversão da deriva vertical do plasma ionosférico . . . . .	11
2.3.2 Instabilidade Rayleigh-Taylor . . . . .	12
2.3.3 Ventos neutros termosféricos . . . . .	13
2.3.4 Teoria do dínamo . . . . .	15
2.3.5 Anomalia de ionização equatorial . . . . .	15
2.4 Tempestade geomagnética . . . . .	17
2.4.1 Dínamo perturbado . . . . .	18
<b>3 OBTENÇÃO DO TEC</b> . . . . .	<b>21</b>
3.1 O sistema GNSS . . . . .	21
3.2 Obtenção do TEC a partir de dados do GPS . . . . .	22
3.2.1 Refração Ionosférica . . . . .	26
3.2.2 Cálculo do TEC a partir das pseudodistâncias . . . . .	29
3.2.3 Cálculo do TEC a partir da fase da portadora . . . . .	31
3.2.4 Obtenção do TEC vertical . . . . .	33
3.3 Métodos de Cálculo do TEC . . . . .	34
3.3.1 Técnica do INPE . . . . .	36
3.3.2 Técnica do BC . . . . .	37
3.3.3 Técnica do ICTP . . . . .	38
3.4 Modelo NeQuick2 . . . . .	38
<b>4 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>43</b>
4.1 Período de dados . . . . .	44

4.2	Métodos de análise . . . . .	44
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>47</b>
5.1	Análise da variabilidade diária e perturbação geomagnéticas . . . . .	47
5.1.1	Análise das curvas de TEC . . . . .	48
5.1.2	Correlação do modelo NeQuick2 com respeito as técnicas . . . . .	53
5.1.3	Diferenças entre as técnicas . . . . .	62
5.1.4	Combinação das técnicas . . . . .	74
5.1.5	Teste de qualidade para os dias selecionados . . . . .	78
5.2	Análise da variabilidade sazonal e do ciclo solar . . . . .	81
5.2.1	Variabilidade sazonal no mínimo solar . . . . .	82
5.2.2	Diferenças entre as técnicas no mínimo solar . . . . .	88
5.2.3	Variabilidade sazonal no máximo solar . . . . .	97
5.2.4	Diferenças entre as técnicas no máximo solar . . . . .	102
5.2.5	Análise do comportamento do TEC no mínimo e máximo solar . . . . .	107
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES . . . . .</b>	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>115</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A ionosfera é definida como a camada da atmosfera terrestre que possui cargas elétricas (devido a presença de íons e elétrons), constituindo-se em um ambiente onde eventos eletrodinâmicos podem surgir com uma fenomenologia própria. Ela encontra-se entre 60 a 1000 km acima da superfície da Terra, aproximadamente. A sua principal fonte de ionização é o fluxo constante de radiação advindo do Sol que contém diversos comprimentos de onda, dentre eles, o Extremo Ultra Violeta (EUV), o Ultra Violeta (UV), os raios-X, além de outros de menor influência, que, geralmente, ionizam regiões mais baixas da ionosfera (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). Durante a noite, uma vez que a fonte solar ionizante é cessada, os processos de recombinação passam a dominar, tornando-a menos ionizada.

A principal característica da ionosfera é a influência na propagação de ondas de rádio, permitindo a comunicação ainda que para localidades de distância muito grandes em relação ao local de geração do sinal, além de interferir na transferência de dados entre satélites e seus respectivos receptores de sinal no solo (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

A ionosfera divide-se em três regiões principais: D, E e F. A região D localiza-se entre 60 e 80 km de altura. A sua principal fonte de ionização é devida a radiação Lyman- $\alpha$ , radiações EUV e os raios-X. A região E se encontra entre 80 e 150 km de altura, sendo sua ionização mais notável durante o dia (HARGREAVES, 1992). Ela é formada pelas radiações solares nas faixas de 31 a 100 Å, principalmente pelas linhas Lyman- $\beta$  e Lyman-contínuo (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

O pico de densidade eletrônica encontra-se na região F, aproximadamente entre 250 e 350 km de altitude. Durante o dia, esta camada é dividida em duas outras sub-camadas, F1 e F2, em que a ionização assume propriedades diferentes. A camada F1 estende-se até  $\sim 240$  km, e principalmente contém íons  $\text{NO}^+$ . Na camada F2, que se estende para altitudes maiores, estão presentes principalmente íons  $\text{O}^+$ . A região F é importante, pois essa camada pode atingir as concentrações máximas de densidade de elétrons, tornando-se mais espessa e mais reflexiva às ondas eletromagnéticas (KELLEY, 2009).

Um parâmetro muito estudado que descreve a ionosférica, foco deste trabalho, é o Conteúdo Eletrônico Total (do inglês “Total Electron Content” - TEC). Ele pode ser mensurado a partir de redes de receptores do Sistema de Navegação por Satélite (do inglês “Global Navigation Satellite System” - GNSS). Com as medidas de TEC é

possível verificar variabilidades devido à presença de irregularidades e da distribuição espacial e temporal da densidade eletrônica, que são responsáveis pela maior parte dos efeitos de degradação nos sinais GNSS. Em síntese, o TEC é definido como sendo o número de elétrons em uma coluna inclinada com uma seção transversal de  $1 \text{ m}^2$ . Este parâmetro é dado em unidades de TEC ( $1\text{TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ ), e se estende a partir de satélites do Sistema de Posicionamento Global (do inglês “Global Positioning System” - GPS) até o observador (PARKINSON, 1996).

As variações do TEC devem-se às variações de ionização diária, aos efeitos de sazonalidade, à presença de anomalias e irregularidades, à fase do ciclo solar e à atividade geomagnética. Tais variações influenciam diretamente a densidade eletrônica na ionosfera. Adicionalmente a componente latitudinal da coordenada da localização tem forte influência devido à variação do ângulo zenital do sol, que atua de forma direta no nível de radiação, que por sua vez, modifica a densidade eletrônica na ionosfera (MONICO, 2008).

Na ionosfera equatorial, outro fenômeno que altera o TEC é o efeito fonte, que tende a direcionar conteúdo eletrônico para latitudes fora do equador, devido ao processo de deriva de plasma e difusão ao longo das linhas do campo geomagnético. Este fenômeno causa a diminuição do TEC na região equatorial e o aumento deste em regiões mais afastadas do equador geomagnético em aproximadamente ( $\pm 15^\circ$ ) de latitude geomagnética durante o dia (RODRIGUES, 2003).

Outras características que podem ser verificadas na ionosfera equatorial e de baixas latitudes e causam degradação nos sinais de GPS são as bolhas de plasma, grandes regiões de depleção do plasma que podem atingir centenas de quilômetros e causar severa interferência na transmissão de ondas de rádio (KELLEY, 2009).

Geralmente, o fenômeno de irregularidades de grande escala está também relacionado com a cintilação ionosférica. O nível desta cintilação é medido pelo índice S4 que tem significância a partir de 0,4 e é considerado severo quando próximo a 1,0. Fenômenos como a cintilação geram o enfraquecimento do sinal da constelação GNSS recebido pelo receptor, piorando a qualidade do sinal, o que é refletido no TEC (MONICO, 2008). Portanto, o TEC entre o satélite e o receptor fica sujeito a tais fenômenos e pode fornecer informações sobre essas variações.

O estudo ionosférico de sistemas GNSS tem aplicações em diversas áreas, desde calibrações de atraso ionosférico para aplicação de geoposicionamento a estudos de irregularidades ionosféricas geradas por condições locais ou por perturbações

externas.

As chamadas curvas de TEC, que descrevem a variação do conteúdo eletrônico total no tempo em uma determinada região, devem reproduzir com o mínimo de erro e artefatos este importante parâmetro sob diferentes condições, apesar das peculiaridades da ionosfera local.

Esta dissertação foi dividida em 6 Capítulos e organizada da seguinte forma: no Capítulo 1, após uma introdução, são apresentados os objetivos e a justificativa deste trabalho; no Capítulo 2 é feita uma fundamentação teórica a respeito da configuração ionosférica e alguns efeitos que afetam o TEC na ionosfera equatorial e de baixas latitudes; no Capítulo 3 é apresentada a obtenção do TEC; no Capítulo 4 é abordada a metodologia deste trabalho; no Capítulo 5 são apresentados os resultados de mestrado que abrangem análises de variabilidade diária, período calmo e perturbado, sazonalidade e variabilidade devido ao ciclo solar do TEC, fazendo um comparativo entre os resultados das técnicas estudadas; por fim, no Capítulo 6 são feitas as conclusões e recomendações referentes aos resultados obtidos e planos para trabalhos futuros.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Nesta pesquisa de mestrado o objetivo foi realizar o estudo da adequação do uso de diferentes métodos utilizados pela comunidade científica internacional para o cálculo do TEC da ionosfera a partir de dados de receptores GPS de solo, com ênfase no comportamento resultante sob as condições presentes na região equatorial e sobre a crista sul da anomalia equatorial brasileira. Para isso foram avaliados três métodos desenvolvidos e largamente utilizados em três regiões diferentes do globo sendo que um deles foi recentemente re-adequado para uso sob as condições brasileiras. O desempenho de cada método foi avaliado a partir da observação da variação diurna, sazonal, em períodos calmos e um período perturbado, entre duas estações, sendo uma na crista da anomalia equatorial, e outra na região equatorial. Cada técnica foi desenvolvida para responder às condições ionosféricas em qualquer região do globo; porém, com ênfase nas condições locais. Assim, pode-se fazer uma análise comparativa se o método atualmente em uso pelo programa de clima espacial do INPE (Embrace) apresenta confiabilidade em seus resultados. Os cálculos de TEC que serão utilizados neste trabalho foram realizados seguindo as técnicas: do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-Brasil), Boston College (BC-EUA)

e International Centre for Theoretical Physics (ICTP-Itália). Cada modelo utilizado será abordado nas próximas sessões.

Como referência foram utilizados os resultados de TEC obtidos com o modelo NeQuick2 no estudo do período perturbado e o desempenho das técnicas foi avaliado utilizando a comparação e o coeficiente de correlação de Pearson.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral desta dissertação foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Utilização de diferentes técnicas para cálculo do TEC vertical (do inglês “Vertical Total Electron Content” - VTEC);
- b) Classificação de características específicas de cada técnica analisada;
- c) Comparação do desempenho das técnicas para o cálculo do VTEC;
- d) Analisar o potencial das técnicas no desempenho da detecção da:
  - Variação diurna;
  - Período calmo e perturbado;
  - Variação sazonal;
  - Variação devido ao ciclo solar.
- e) Analisar e investigar os resultados obtidos para se identificar o desempenho dos mesmos para uso na ionosfera equatorial e de baixas latitudes brasileira;
- f) Analisar as técnicas pelo coeficiente de correlação de Pearson;
- g) Avaliação do desempenho das técnicas com o teste da qualidade do TEC estimada a partir do desvio padrão obtido pelo TEC.

## **1.2 Justificativa para o desenvolvimento do trabalho**

A ionosfera apresenta variações diurnas, sazonais, entre períodos geomagneticamente calmos e perturbados, em função da fase do ciclo solar e devido a outros fatores. Somam-se a isso as características específicas da ionosfera equatorial e de baixas



latitudes como a brasileira que apresenta o desenvolvimento de grandes irregularidades equatoriais e altos gradientes de densidade na região da anomalia equatorial. Todos estes fatores tornam a obtenção do TEC a partir das observáveis obtidas por receptores GNSS em solo algo muito sensível. As especificidades da ionosfera local no momento da observação podem gerar alterações no sinal recebido pelo receptor e, conseqüentemente, não serem traduzidos de maneira adequada em termos do TEC gerado.

Os métodos de cálculo do TEC utilizados na Europa, nos Estados Unidos, na Ásia ou na América do Sul não apresentam grandes alterações entre si e se mostram bem confiáveis para descrever a ionosfera nas regiões onde foram originalmente desenvolvidos. Dessa forma são largamente utilizados para se calcular o TEC a partir de observações em receptores em solo em outras regiões do globo. No Brasil, o INPE, com o seu programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace), passou a utilizar um método para cálculo de TEC desenvolvido originalmente na Universidade de Nagoya. Os resultados se mostraram coerentes de uma maneira geral. Porém, alguns casos de TEC negativo ou com comportamento extremos levantaram a questão da confiabilidade em se utilizar um método desenvolvido para responder bem às condições da ionosfera sobre o Japão para caracterizar a nossa ionosfera. Isso levou a uma re-adequação do método considerando-se uma melhor resposta às condições brasileiras. Este estudo é uma tentativa de demonstrar que o método que está sendo implementado no Embrace atende bem às características locais para apresentar resultados confiáveis e adequados de TEC.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Camadas ionosféricas

A ionosfera situa-se na parte superior da atmosfera, estendendo-se a partir de altitudes de cerca de 60 km até aproximadamente 1000 km. Esta camada possui quantidade de íons e elétrons livres suficiente para afetar a propagação das ondas de rádio. A densidade eletrônica depende fortemente da altitude, uma vez que esta irá variar conforme a intensidade da radiação ionizante proveniente do Sol, da sua absorção pelos constituintes atmosféricos, e também da magnitude dos processos de recombinação de íons (processos do tipo Lyman- $\alpha$ ) ou por captura de elétrons (processos do tipo Lyman- $\beta$ ), bem como a atividade solar (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

A estrutura da ionosfera está dividida em regiões, especificadas como se segue:

- Região D

Localizada a cerca de 60 a 80 km de altura acima da superfície terrestre. Está presente essencialmente durante o dia, porque a sua densidade de elétrons cai drasticamente durante a noite devido ao processo de recombinação (KELLEY, 2009). É produzida por processos de fotoionização da radiação solar, Lyman- $\alpha$  e por raios cósmicos que ionizam gases como O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e NO. Possui principalmente o efeito de absorver ou atenuar os sinais de comunicação de rádio frequência. O nível de atenuação depende da frequência, sendo que as baixas frequências são atenuadas mais do que as superiores. Constantemente os sinais de baixa frequência são bloqueados na região D impedidos de alcançar altitudes maiores, exceto à noite quando a mesma desaparece.

- Região E

Entre cerca de 80 e 150 km de altura, acima da região D, também possui caráter essencialmente diurno (HARGREAVES, 1992). Formada principalmente por raios X leves e pela radiação solar ultravioleta (KELLEY, 2009), contendo Fe<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup> e Si<sup>+</sup>. Nesta região ocorre reflexões de ondas de rádio com frequências abaixo de 10 MHz.

No entanto, na região E, devido a diferentes mecanismos, pode-se desenvolver uma camada ionizada fina (com espessura entre 0,2 e 2 km), muito densa, que tem o nome de camada E esporádica. Em baixas e médias latitudes tal camada tem uma maior ocorrência nos meses de verão, durante o dia e no início da noite. Em altas

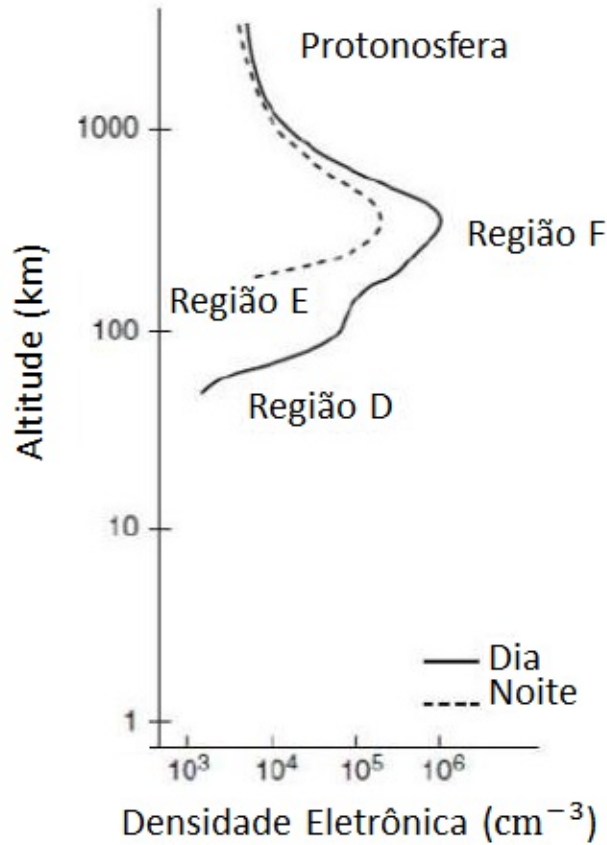
latitudes ela, tende a se formar predominantemente à noite. Esta camada esporádica pode causar cintilação na fase e na amplitude do sinal de GPS (WU et al., 2005).

- Região F

A região mais elevada da ionosfera, compreende altitudes desde 150 km podendo se estender até aproximadamente 1000 km. É a região mais ionizada, a sua formação se dá por ionização atômica sob a ação de radiações ultravioletas, predominando a formação do  $O^+$ . Possui caráter permanente, isto é, sua densidade eletrônica está presente significativamente durante o dia e a noite. Durante o dia pode se subdividir em três regiões, denominadas F1, F2 e F3. A região F é a mais importante em matéria de radiopropagação, pois é nela que acontece a reflexão de ondas em diversas frequências, incluindo as mais altas até 20 MHz. A região F3 foi descoberta recentemente, encontra-se em baixas latitudes, em períodos de baixa atividade solar (BALAN et al., 1997; BATISTA et al., 2003).

A Figura 2.1 ilustra a distribuição das camadas ionosféricas.

Figura 2.1 - Perfil de densidade do plasma ionizado segundo as camadas.



Fonte: Adaptada de Kelley (2009).

Na Figura 2.1 observa-se a variação da densidade eletrônica separadas por camadas, que foram descritas anteriormente, onde a linha pontilhada representa a noite, e a linha inteira o dia.

## 2.2 Processos de transporte

Os gases ionizados formados na alta atmosfera são denominados plasma ionosférico, este está sujeito a alguns processos de transporte, devido a forças gravitacionais e colisionais, a força elétrica e magnética, ocasionando o deslocamento dos íons e elétrons.

A equação do movimento do plasma ionizado ( $j$ ) pode ser expressa por (KELLEY,

2009):

$$\rho_j \frac{d\vec{V}_j}{dt} = -\nabla p_j - \sum_{k(k \neq j)} \rho_j \nu_{jk} (\vec{V}_j - \vec{V}_k) + \rho \vec{g} + n_j q_j (\vec{E} + \vec{V}_j \times \vec{B}). \quad (2.1)$$

Levando em conta os seguintes itens:

- a) Gradiente de pressão:  $-\nabla p_j$ ;
- b) Força de fricção:  $\rho_j \nu_{jk} (\vec{V}_j - \vec{V}_k)$ ;
- c) Força de Lorentz:  $n_j q_j (\vec{E} + \vec{V}_j \times \vec{B})$ ;
- d) Força gravitacional:  $\rho \vec{g}$ .

Sendo  $\rho_j$  a densidade volumétrica,  $\vec{V}_j$  a velocidade,  $p_j$  a pressão,  $\nu_{jk}$  a frequência de colisão entre a espécie  $j$  e  $k$ ,  $\vec{V}_k$  a velocidade da espécie  $k$ ,  $\vec{g}$  a gravidade,  $n_j$  a densidade numérica,  $q$  a carga,  $\vec{E}$  o campo elétrico e  $\vec{B}$  o campo magnético.

Por consequência os três agentes responsáveis pelo transporte do plasma ionosférico são:

- Gradiente de Pressão e efeitos Gravitacionais

O gradiente de pressão e os efeitos gravitacionais fazem com que os íons e os elétrons sofram difusão no decorrer das linhas de campo geomagnético.

- Ventos Neutros

Os gradientes de pressão que surgem devido ao aquecimento solar e marés atmosféricas geram oscilações denominados de ventos neutros. As marés atmosféricas que se encontram na baixa ionosfera geram corrente elétrica devido ao dínamo atmosférico, na região E. Os ventos termosféricos, predominante da alta ionosfera, são ocasionados devido ao aquecimento diurno e o esfriamento da atmosfera noturna (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

- Campos Elétricos

Na baixa ionosfera correntes são geradas por campos elétricos, movimentando íons e elétrons na alta ionosfera. Os ventos neutros e o dínamo da região E (diurna) e F (noturna) geram campos elétricos que, por sua vez, movimentam o plasma.

Devido à interação  $\vec{E} \times \vec{B}$  surge a deriva eletromagnética, que carrega o plasma perpendicularmente ao campo magnético.

### 2.3 Características relevantes na ionosfera equatorial e de baixas latitudes

A ionosfera equatorial e de baixas latitudes possui diferentes características, como a presença do sistema de correntes e instabilidades oriundos do eletrojato equatorial, a presença da Anomalia de Ionização Equatorial (do inglês “Equatorial Ionization Anomaly” - EIA), bem como as irregularidades do plasma durante a noite.

A formação de campos elétricos se dá pela interação das partículas carregadas com o campo geomagnético e com os ventos provenientes de marés atmosféricas. O fenômeno que dá origem a estrutura e formação das camadas ionosféricas, e a composição da ionosfera equatorial e de baixas latitudes, é devido ao transporte vertical do plasma, bem como aos processos químicos de produção e perda.

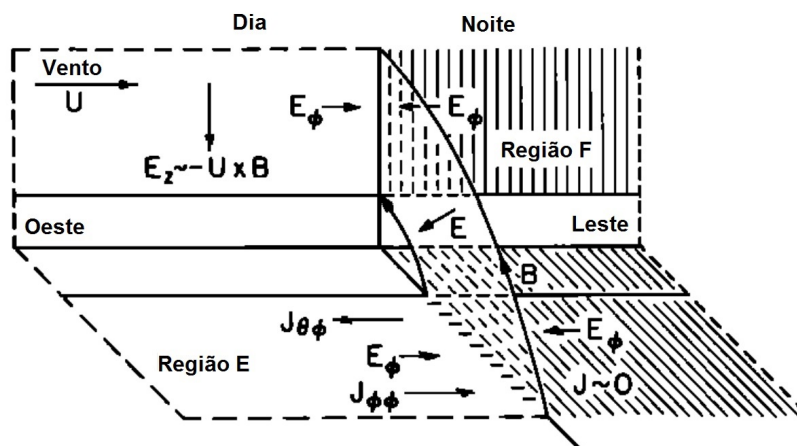
As instabilidades de plasma ocorrem durante a noite, devido a ondas atmosféricas, que se formam na atmosfera neutra, podendo se intensificar durante tempestades magnéticas fazendo com que ocorra processos de acoplamento ionosfera-termosfera (OTT, 1978; KELLEY, 2009).

#### 2.3.1 Pico pré-reversão da deriva vertical do plasma ionosférico

Na região F da ionosfera, ocorre um súbito aumento da velocidade de subida do plasma após o pôr do Sol, isso ocorre devido aos efeitos do vento termosférico juntamente com o gradiente longitudinal de condutividade na região E, que possuem valores altos nesse horário (HEELIS et al., 1974; BATISTA, 1985). A região F então se torna instável devido à subida do plasma para maiores altitudes, fazendo com que qualquer perturbação gere a chamada bolha de plasma.

Para um melhor entendimento da formação do pico pré-reversão, é utilizado um modelo que ilustra de forma simplificada esse fenômeno na [Figura 2.2](#).

Figura 2.2 - Mecanismo de geração do campo elétrico zonal



Fonte: Adaptada de Farley et al. (1986).

De acordo com Farley et al. (1986) um campo elétrico é gerado na região F ( $E_z \cong -\vec{U} \times \vec{B}$ ) devido ao vento termosférico  $\vec{U}$ , que sopra para leste em direção ao terminadouro. O campo gerado  $E_z$  é mapeado para a região E no decorrer das linhas de campo geomagnético  $\vec{B}$  em direção ao equador, criando o campo  $E_\theta$ , indicado na Figura 2.2, criando assim uma corrente Hall zonal na direção oeste  $J_{\theta\phi}$ . A condutividade na região E sofre uma queda ao anoitecer, produzindo assim um acúmulo de elétrons no terminadouro solar, para manter um equilíbrio eletrostático é induzido um campo elétrico zonal para leste  $E_\phi$ , gerando então uma corrente Pederson  $J_{\phi\phi}$ , que num estado estacionário anula-se com a Hall  $J_{\theta\phi}$ . O campo elétrico  $E_\phi$  é então mapeado para a região F, provocando uma subida brusca do plasma ao entardecer na deriva vertical do plasma. Esse fenômeno recebe o nome de pico pré-reversão.

### 2.3.2 Instabilidade Rayleigh-Taylor

A teoria da instabilidade Rayleigh-Taylor explica a formação das bolhas de plasma (KELLEY, 2009), essa teoria é ilustrada na Figura 2.3. Sabendo que existem dois fluidos distintos sendo que as densidades são dadas por  $n_1$  e  $n_2$ , onde  $n_1 > n_2$ , existindo um gradiente de densidade se dirigindo pra cima ( $\vec{\nabla}n$ ), conforme mostra a Figura 2.3. Este mecanismo está sob efeitos da gravidade ( $\vec{g}$ ) e da ação de um campo magnético horizontal ( $\vec{B}$ ). Os efeitos colisionais são desprezados, e supondo



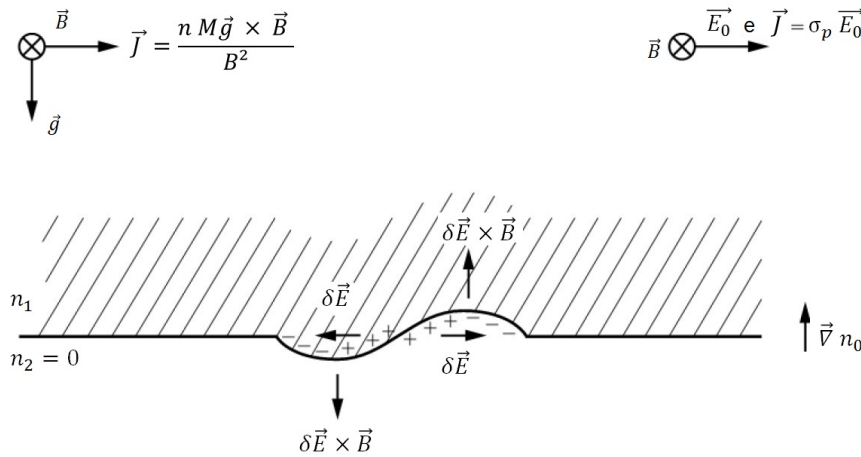
que ocorra qualquer perturbação na superfície que separa os dois fluidos. A interação do campo magnético ( $\vec{B}$ ) com a gravidade ( $\vec{g}$ ) gera um fluxo de corrente horizontal na direção  $x$  ( $\vec{J}_x$ ), dado por:

$$\vec{J}_x = \frac{nM\vec{g} \times \vec{B}}{B^2}. \quad (2.2)$$

Sendo,  $M$  a massa dos íons e  $n$  a densidade do plasma.

Devido a perturbação na superfície, diverge a corrente, fazendo com que haja um acúmulo de cargas na borda, originando um campo elétrico de polarização ( $\delta\vec{E}$ ), gerando uma deriva das cargas na presença desse campo elétrico, resultando em  $\delta\vec{E} \times \vec{B}$ . Tal deriva faz com que se formem as chamadas bolhas de plasma, onde o plasma menos denso sobe e o mais denso desce.

Figura 2.3 - Instabilidade Rayleigh - Taylor



Fonte: Adaptada de Kelley (2009).

### 2.3.3 Ventos neutros termosféricos

A distribuição da temperatura, devido à incidência da radiação solar, é desigual, provocando movimentos que tendem a criar o equilíbrio termodinâmico da atmosfera.

Os ventos neutros, que surgem devido aos gradientes de pressão pela variação de densidade e temperatura, são movimentos que ocorrem horizontalmente e de locais de alta pressão para os de baixa pressão, soprando do lado diurno para o lado noturno.

Os ventos termosféricos são aqueles gerados acima de 120 km, resultados da expansão térmica ocorrida durante o dia, devido ao aquecimento por incidência solar na faixa do extremo ultravioleta, ocasionando uma expansão térmica da atmosfera (abaulamento atmosférico), que por sua vez gera gradientes de pressão, fazendo com que ocorra o movimento das partículas da ionosfera para altitudes maiores no período noturno.

Matematicamente, podem-se determinar as velocidades horizontais a partir da equação do movimento, prevendo a direção dos ventos termosféricos (RISHBETH; GARRIOTT, 1969), no entanto as equações se dão de formas bidimensionais.

$$\frac{dU_x}{dt} - 2\Omega U_y \text{sen}\varphi = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_x}{\partial h^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu_{ni}(U_x - V_{ix}), \quad (2.3)$$

$$\frac{dU_y}{dt} - 2\Omega U_x \text{sen}\varphi = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_y}{\partial h^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \nu_{ni}(U_y - V_{iy}). \quad (2.4)$$

onde:

$U$  - velocidade do vento neutro;

$V$  - velocidade de deriva dos íons;

$\Omega$  - velocidade angular da Terra;

$\rho$  - densidade do gás neutro;

$p$  - pressão do gás;

$h$  - altura;

$\varphi$  - latitude;

$\mu$  é o coeficiente de viscosidades;

$\nu_{ni}$  - coeficiente de colisão entre os elementos neutros e os íons.

### 2.3.4 Teoria do dínamo

Segundo a teoria do dínamo são produzidos movimentos de partículas carregadas por ventos de marés. Os ventos e as correntes a ele associadas se dividem em duas componentes, com respeito a variações solares e lunares, para condições calmas. Champman e Bartels conseguiram realizar esse cálculo do sistemas de correntes, sendo referência até os dias atuais (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; DENARDINI, 2004).

Como mencionado anteriormente, os ventos provenientes de marés geram um movimento através das linhas de campo geomagnético, levando os íons e elétrons a se deslocarem segundo as mesmas. O dínamo então gera campos elétricos.

Na região E os campos elétricos formados surgem devido à ação do dínamo provocados por ventos de marés devido a absorção da radiação solar UV e também devido ao campo gravitacional da lua. Na região F os campos elétricos do dínamo provém de marés térmicas que são geradas pela absorção de radiação EUV na termosfera (ABDU, 2005).

A ação da temperatura termosférica e os gradientes de pressão devido à variação de temperatura dá a direção dos ventos, que possuem dependência com a viscosidade e o arraste iônico.

Na região E o dínamo predomina na ionosfera diurna, gerando campos elétricos, por outro lado, na região F o dínamo ocorre durante a noite, controlando o campo elétrico de polarização e dando origem às derivas eletromagnéticas devido à frequência de colisão ser muito menor que a girofrequência ( $\nu \ll \omega$ ). A velocidade de deriva do plasma nessa região é dado então por (RISHBETH; GARRIOTT, 1969):

$$\vec{V}_E = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}. \quad (2.5)$$

Junto com os campos elétricos gerados pelo dínamo da região E equatorial, tem-se a ação do chamado eletrojato equatorial, um intenso sistema de correntes elétricas que circula ao longo do equador magnético para leste durante o dia e para oeste à noite.

### 2.3.5 Anomalia de ionização equatorial

O mecanismo de formação da Anomalia de Ionização Equatorial (do inglês “Equatorial Ionization Anomaly” - EIA), ou também chamada de anomalia de Appleton, é o

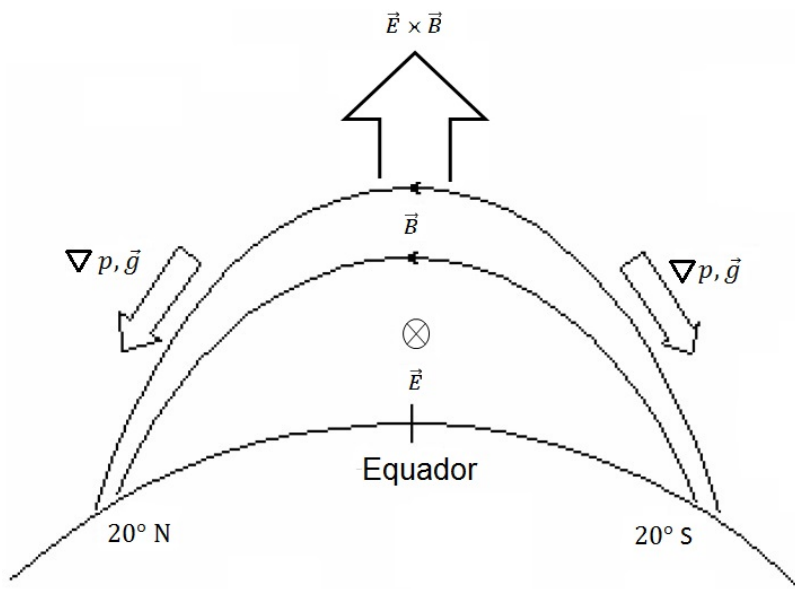
chamado efeito fonte ocasionado pela combinação de campos elétricos e magnéticos.

Durante o dia, o Sol através do processo de fotoionização, dá origem aos compostos carregados constituintes da ionosfera terrestre. Portanto, pela maior incidência do Sol na região equatorial, seria natural supor que nessa região haveria uma maior densidade eletrônica mas, no entanto, esse comportamento não ocorre. Isto porque na região equatorial as linhas de campo geomagnético são horizontais, paralelas à superfície terrestre, e esse campo interage com o campo elétrico zonal que é proveniente de ventos neutros, resultando em uma deriva vertical do plasma equatorial (KELLEY, 2009). A velocidade de deriva foi obtida da seguinte forma:

$$\vec{V} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (2.6)$$

Durante o dia, esta deriva eleva o plasma ionosférico para elevadas altitudes, mas com os efeitos gravitacionais e gradientes de pressão, o plasma percorre as linhas de campo geomagnético indo para regiões de baixas latitudes, concentrando entre  $\pm 20^\circ$  em relação ao equador magnético. Assim como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Formação da Anomalia de Ionização Equatorial.



Fonte: Adaptada de Kelley (2009).

Os picos de densidade eletrônica que ocorrem entre  $\pm 20^\circ$  são chamados de crista da EIA. No perfil latitudinal da EIA os ventos termosféricos meridionais podem intensificar as cristas.

É importante ressaltar que na região que se encontra a EIA, o TEC apresenta valores significativamente maiores e grandes gradientes espaciais, podendo influenciar a propagação das ondas de rádio, possibilitando o aumento de cintilações ionosféricas.

## 2.4 Tempestade geomagnética

Tempestades geomagnéticas são decorrentes de alterações no campo magnético da Terra, devido ao impacto de partículas provenientes do vento solar na magnetosfera terrestre. A tempestade geomagnética pode ser decorrente de uma ejeção de massa coronal (do inglês “Coronal Mass Ejection” - CME), ou de um feixe rápido. Devido a esses efeitos, uma grande quantidade de energia atinge a parte superior da atmosfera da Terra alterando a distribuição e concentração de cargas nas camadas ionizadas, caracterizando as chamadas tempestades ionosféricas.

A frente da magnetosfera é chamada de frente de choque, pois é onde ocorre a interação do vento solar com a magnetosfera da terra, aumentando a intensidade do campo geomagnético, devido ao fato de o vento solar comprimir as linhas de campos. O sistema ionosfera-termosfera de elevadas altitudes ganha energia, proveniente do impacto inicial. As partículas percorrem as linhas de campo geomagnético penetrando em alguns locais, fazendo com que a corrente de anel se intensifique, partículas precipitam também nos polos, formando as auroras. A tempestade magnética pode ser dividida em três fases: inicial, principal e de recuperação.

- Fase inicial: Devido à compressão da magnetosfera terrestre, com a interação do vento solar, provoca um aumento no campo magnético da Terra.
- Fase Principal: Com a intensificação da corrente de anel, o campo magnético diminui, devido a geração de um campo magnético oposto ao campo geomagnético.
- Fase de Recuperação: O campo magnético retorna aos poucos ao seu estado inicial sem perturbação.

A rápida penetração de campos elétricos (do inglês “Prompt Penetration Electric Field” - PPEFs) caracteriza as respostas ionosféricas que ocorrem durante a fase principal das tempestades magnéticas. O aumento do TEC em médias e baixas latitudes são consequência das derivas verticais provenientes dos campos elétricos

direcionados para leste que fluem através da difusão do plasma no decorrer das linhas de campo geomagnéticas (NISHIDA, 1968). Por outro lado, efeitos tardios podem causar a diminuição do TEC, como aqueles devidos ao dínamo perturbado. Essas condições especiais representam um bom teste para se avaliar a capacidade de cada técnica em descrever as variações do TEC de maneira satisfatória.

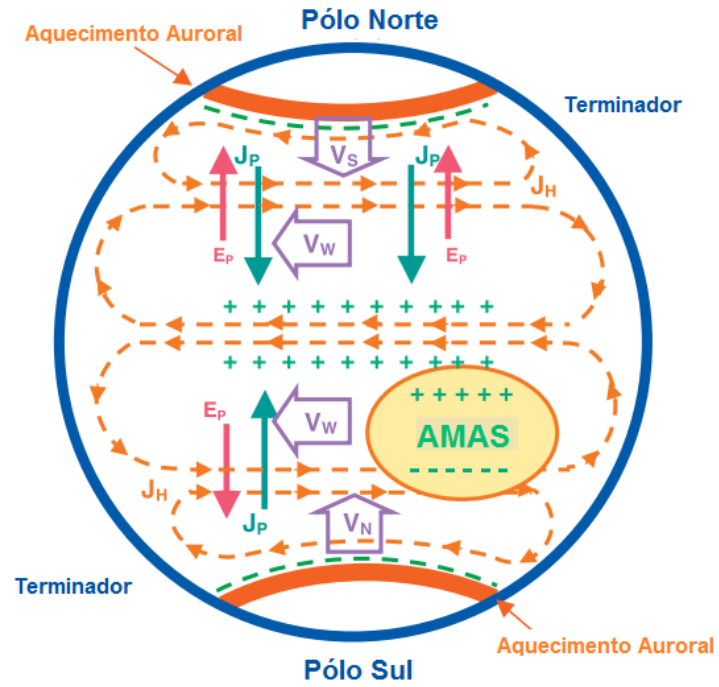
Índices geomagnéticos são utilizados para caracterizar tempestades geomagnéticas. Dentre eles estão: Ap, Kp, Dst, AE, SymH, AsyH, SymD, e AsyD.

Neste trabalho iremos utilizar apenas o SYM-H e o Kp que permitem identificar as fases da tempestade magnética e o nível de perturbação geomagnética respectivamente. O nível de perturbação dado pelo índice Kp, são estabelecidos por valores de 0 a 9, sendo que os períodos considerados calmos correspondem aos valores de 0 a 4, e acima desses valores considera-se períodos geomagneticamente perturbados. Para o índice SYM-H, valores abaixo de -30nT (SYM-H) já correspondem a tempestades geomagnéticas.

#### 2.4.1 Dínamo perturbado

O mecanismo do dínamo perturbado é ilustrado na [Figura 2.5](#). Os ventos perturbados são gerados devido ao aquecimento auroral, durante as perturbações magnéticas. Esse vento é inicialmente dirigido para o equador, e devido o efeito de Coriolis adquire-se uma velocidade para oeste em relação à Terra . Uma corrente, chamada Pedersen ( $J_P$ ) direcionada para o equador é produzida devido ao vento perturbado direcionado para oeste em médias latitudes, resultando em uma separação de cargas, onde a ionosfera de baixa latitude fica positiva até o fluxo de corrente ser interrompido pelo campo elétrico ( $E_P$ ) resultante da polarização. O campo elétrico de polarização é perpendicular às linhas de campo magnético que são dirigidas para cima (para baixo) em médias latitudes do hemisfério sul (norte), produzindo uma deriva de plasma para o oeste e uma corrente Hall para leste ( $J_H$ ). Dois vórtices de corrente são gerados devido a interrupção da corrente Hall nos terminadores e produz um campo elétrico no amanhecer, que possui polaridade oposta à do campo elétrico do dínamo do sistema Sq em períodos calmos. O campo elétrico do crepúsculo-amanhecer se estende a baixas latitudes e ao equador pela ionosfera condutora. Contudo, a geração de um campo elétrico sobre latitudes equatoriais/baixas, marca a chegada dos ventos perturbados em latitudes médias (ABDU et al., 2006).

Figura 2.5 - Diagrama esquemático do mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado.



Fonte: Adaptada de Abdu et al. (2006).





### 3 OBTENÇÃO DO TEC

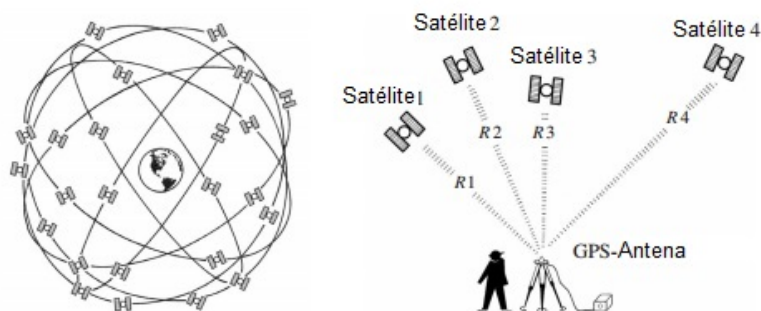
#### 3.1 O sistema GNSS

O Sistema de Navegação por Satélite (do inglês “Global Navigation Satellite System” - GNSS) fornece o posicionamento geoespacial com cobertura global permitindo, a partir dos dados coletados nos receptores, determinar as coordenadas geográficas (longitude, latitude e altitude) de qualquer ponto na superfície da Terra. O GNSS engloba o Sistema de Posicionamento Global (do inglês “Global Positioning System” - GPS) dos Estados Unidos da América; o Glonass da Federação Russa; o Galileo da União Europeia; e o Beidou da China.

O GPS foi o primeiro sistema GNSS desenvolvido sendo o mais largamente utilizado. Este sistema de posicionamento possui várias utilidades em aplicações civis tais como navegação em terra, ar e mar; telefones celulares; topografia e geodésia; agricultura; desporto e lazer; além de aplicações militares estratégicas como em busca e salvamento, reconhecimento e mapeamento de áreas, dentre inúmeras outras. A localização ocorre por meio da transmissão de sinais de rádio enviados a partir de cada satélite da constelação em direção à redes de receptores localizadas no solo.

O GPS é dividido em segmento espacial, de controle e de usuário. O segmento espacial é formado por 24 satélites ou mais, equidistantes, em planos de orbitas diferentes. Dessa forma pode-se garantir, que pelo menos 4 satélites possam ser rastreado em qualquer lugar da superfície da Terra, em qualquer hora (MONICO, 2008). Embora 3 satélites sejam suficientes para, geometricamente, se determinar uma dada posição desejada, um quarto satélite usualmente é adicionado para efeitos de correção temporal. A [Figura 3.1](#) a seguir ilustra este procedimento.

Figura 3.1 - Princípios básicos de posicionamento GPS.



Fonte: Adaptada de Seeber (2003)

Cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras de frequência L1, L2 e um novo sinal, L5, cujas frequências correspondentes estão representadas na Tabela 3.1. As frequências são geradas ao mesmo tempo para os usuários, possibilitando que L1 e L2 corrijam grande parte dos efeitos provocados pela ionosfera (MONICO, 2008).

Na Tabela 3.1 está o valor correspondente da frequência de cada onda portadora.

Tabela 3.1 - Frequência das ondas portadoras.

Onda	Frequência (MHz)
$L_1$	1575,42
$L_2$	1227,60
$L_5$	1176,45

### 3.2 Obtenção do TEC a partir de dados do GPS

A técnica básica de navegação GPS é a utilização de um caminho percorrido pela onda eletromagnética que varia a partir dos satélites na visada, que por sua vez, também transmitem as suas posições estimadas, através de uma geometria apropriada, determinada pela latitude, longitude, altitude e um relógio de correção do usuário (MONICO, 2008).

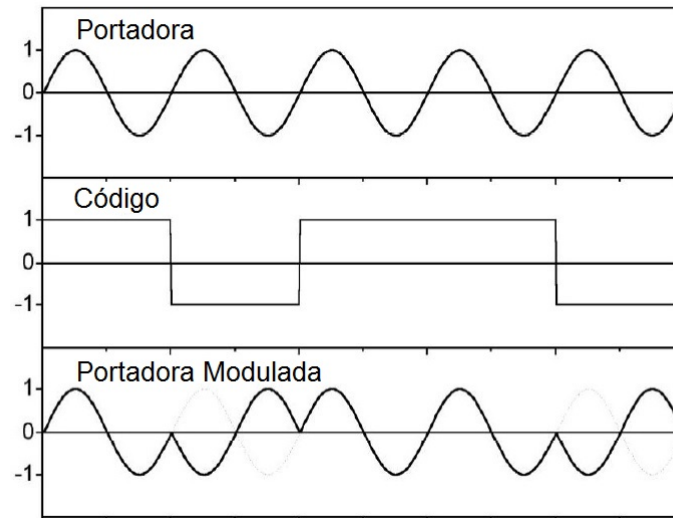
Cada satélite transmite continuamente um sinal de rádio constituído de frequências

portadoras, dois códigos digitais e uma mensagem de navegação. Quando um receptor GPS é ligado, capta o sinal por meio da antena. Em síntese, o receptor de GPS requer apenas três distâncias de três satélites que são visíveis simultaneamente. Neste caso, o receptor vai encontrar todos. É preciso então de um quarto satélite, devido ao erro do relógio. Com esta geometria é possível obter a informação do posicionamento (MONICO, 2008).

A disponibilidade das frequências L1 e L2 permite a correção de um grande erro do sistema GPS: a refração ionosférica. Vale ressaltar que todos os satélites GPS transmitem as mesmas frequências L1 e L2. Contudo, a modulação do código é diferente para cada satélite, o que minimiza a interferência de sinal (MONICO, 2008).

Os dois códigos de GPS são aquisições mais grosseiras (ou código C/A) ou de precisão (P-code). Cada código é constituído por uma sucessão de dígitos binários, zero e um, conhecido como bits. Os códigos são comumente conhecidos como PRN (pseudo ruído aleatório ou ruído pseudo-aleatório), porque possuem aparência de sinais de ruído. Eles são gerados usando um algoritmo matemático. Atualmente, a C/A é modulada apenas no código de frequência L1, ao passo que a P-code é modulada em ambas frequências, L1 e L2. Esta modulação é chamada modulação bifásica, porque a fase da portadora é deslocada em 180 graus, quando o valor do código muda de zero para um, ou a partir de um para zero. Os códigos C/A e P não interferem uns com os outros. A Figura 3.2, ilustra este processo (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994).

Figura 3.2 - Modulação do código sobre a onda portadora.



Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (1994)

O código C/A é uma sequência de 1023 dígitos binários (bits) que se repetem a cada milissegundo (que tem uma taxa de frequência de 1,023 MHz). Isto significa que a duração de um bit é de cerca de 1 s. Para cada satélite é atribuído um único código C/A, o qual permite que os receptores de GPS identifique qual está transmitindo o código. Os códigos não estão correlacionados, a fim de permitir a sua identificação com o receptor. O intervalo de medição do código C/A é menos preciso em relação ao código P. No entanto, é menos complexo e se encontra disponível para todos os usuários (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994).

O código P é um segmento único de uma sequência PRN muito longa de dígitos binários que dura 266 dias. Esta sequência é dividida em 38 segmentos cada um dos quais tem a duração de uma semana. Destes, 32 segmentos são atribuídos aos vários satélites GPS. Portanto, cada satélite transmite um segmento único de uma semana de PRN.

A mensagem de navegação GPS é uma sequência de dados adicionados a ambas frequências L1 e L2 como modulação bifásica. A transmissão completa do código dura 750 segundos (12,5 minutos). A mensagem de navegação contém, entre outras informações, as coordenadas dos satélites GPS em função do tempo, a correção do

relógio do satélite e dados atmosféricos.

As medidas da pseudodistância e fases da portadora são ambas afetadas por vários tipos de ruído e erros sistemáticos (biases). Estes erros podem ser classificados como aqueles que se originam nos satélites, aqueles que se originam no receptor e aqueles que são devido à propagação do sinal. Os erros que se originam em satélites incluem erros de efemérides (erros orbitais) e os erros dos relógios dos satélites. Os erros que se originam no receptor incluem os erros do relógio do receptor, o ruído do receptor e variações do centro de fase da antena. Os erros devido à propagação do sinal são provenientes da refração troposférica e ionosférica, perdas de ciclos e sinais refletidos/multicaminho. Alguns desses erros podem ser eliminados ou reduzidos. Mas o fator de maior importância para esse trabalho e que acaba causando os erros mais significativos, é a refração ionosférica.

As principais fontes de erros que afetam o GPS estão descritas e mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Fontes e efeitos de erros GNSS.

Fontes	Efeitos
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso de grupo
Propagação do sinal	Refração Troposférica Refração Ionosférica perdas de ciclos Sinais Refletidos/Multicaminho
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena
Estação erros e efeitos	Erros nas coordenadas Marés Terrestres Movimento do pólo Carga dos oceanos Pressão da atmosfera

Fonte: Monico (2008).

### 3.2.1 Refração Ionosférica

Refração é a mudança na direção de propagação da onda, ou ainda, mudança no índice de refração do meio em que a onda irá se propagar. O fenômeno é explicado pela conservação da energia e pela conservação do momento. Devido à mudança de meio, a velocidade de fase da onda é alterada, mas sua frequência permanece constante. Isto é observado quando uma onda passa de um meio para outro em qualquer ângulo diferente de  $0^\circ$  (DAVIES, 1965).

Quando um satélite GPS emite um sinal (onda eletromagnética) este, ao passar pela ionosfera, sofre refração, mudando então sua velocidade e causando um erro. Este fato é denominado refração ionosférica.

Matematicamente, essa velocidade pode ser determinada a partir das Equações 3.1 e 3.2.

$$v_f = \lambda f, \quad (3.1)$$

e

$$v_g = -\frac{df}{d\lambda}\lambda^2. \quad (3.2)$$

onde  $v_f$  e  $v_g$  são velocidade de fase (velocidade em que se propagam as portadoras L1 e L2) e velocidade de grupo (velocidade de propagação dos códigos modulados sobre as portadoras), respectivamente,  $\lambda$  é o comprimento da onda e  $f$  é a sua frequência.

Através da diferenciação da Equação 3.1 com relação a  $\lambda$ , tem-se (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994):

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{dv_f}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda}. \quad (3.3)$$

Substituindo 3.3 em 3.2 obtém-se a Equação 3.4, denominada como Equação de Rayleigh:

$$v_g = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda}. \quad (3.4)$$

O índice de refração  $n$  é dependente da propagação da onda em um meio. Assim utilizam-se as devidas substituições nas equações de velocidades de fase e grupo (Equações 3.1 e 3.2), e tem-se  $n_f$  e  $n_g$ , índice de refração para a fase e para o grupo, respectivamente, mostradas nas Equações 3.5 e 3.6.

$$v_f = \frac{c}{n_f}, \quad (3.5)$$

e

$$v_g = \frac{c}{n_g}. \quad (3.6)$$

Com a equação alterada de Rayleigh é possível relacionar os dois índices de refração (Equações 3.7 e 3.8) (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1997):

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda}, \quad (3.7)$$

ou

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df}. \quad (3.8)$$

Estas equações acima são derivadas da equação  $c = \lambda f$ . O índice de refração da fase na ionosfera é aproximado por uma série (SEEBER, 1993), resultando em:

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots, \quad (3.9)$$

no qual  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  somente dependem da densidade de elétrons e no caminho em que se propaga o sinal.

Considerando apenas os efeitos de primeira ordem, tem-se a Equação 3.10.

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2}. \quad (3.10)$$

A partir da equação acima, obtêm-se:

$$dn_f = -2 \frac{c_2}{f^3} df. \quad (3.11)$$

Substituindo-se 3,11 em 3.7, foi obtida a Equação 3.12:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2}. \quad (3.12)$$

Observa-se uma diferença no sinal de  $c_2$  que corresponde ao índice de refração da fase e do grupo. O valor do coeficiente é dado pela Equação 3.13:

$$c_2 = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 m} n_e. \quad (3.13)$$

Onde:  $n_e$  é a densidade de elétrons;  $e$  é a carga do elétron,  $m$  é a massa do elétron;  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica no vácuo.

Podendo ser simplificado e expresso por 3.14:

$$c_2 = -40,3n_e. \quad (3.14)$$

Utilizando o Sistema Internacional de unidades (SI), os índices de refração são da seguinte forma (Equações 3.15 e 3.16).

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2}, \quad (3.15)$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2}. \quad (3.16)$$

As velocidades são diferentes nos sinais, ocorrendo assim um atraso no grupo e um adiantamento na fase. Portanto,  $v_g$  é menor que  $v_f$ .

Sabendo-se que a distância percorrida por uma onda eletromagnética entre satélite



e receptor (S), sem efeitos de erro sistemáticos é dado pela Equação 3.17.

$$S = \int_r^S n ds, \quad (3.17)$$

com  $n$  sendo o índice de refração genérico, podendo ser de fase ou de grupo, já mencionado.

A refração ionosférica  $I_r^S$  é dada considerando a trajetória da onda (Equação 3.17), a diferença entre distância medida e geométrica ( $\rho$ ), correspondendo ao erro sistemático da fase da portadora (MONICO, 2008).

$$I_{f_r}^S = \int_S^r \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) dS - \rho, \quad (3.18)$$

ou

$$I_{f_r}^S = -\frac{40,3}{f^2} \int_S^r n_e dS. \quad (3.19)$$

Por fim, relaciona-se o TEC com a integral ao longo do caminho:

$$TEC = \int_S^r n_e dS. \quad (3.20)$$

E assim, substituindo a Equação 3.20 na 3.19 obteve-se a Equação 3.21:

$$I_{f_r}^S = -\frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (3.21)$$

Para o sinal modulador, a refração ionosférica é dada por:

$$I_{g_r}^S = \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (3.22)$$

### 3.2.2 Cálculo do TEC a partir das pseudodistâncias

As pseudodistâncias são medidas do intervalo de tempo da propagação do sinal entre o satélite e o receptor convertidas para unidades de comprimento. É necessário

multiplicar esse valor de tempo pela velocidade da luz como será descrito a seguir. O procedimento para a determinação da pseudodistância, pode ser descrito supondo que tanto o relógio do satélite com o do receptor controlam a geração de sinal e estão perfeitamente sincronizados. Quando o código (do inglês “Pseudo-Random-Noise” - PRN) é transmitido a partir do satélite, o receptor gera uma réplica exata do código. Depois de um certo intervalo de tempo, equivalente ao tempo de viagem do sinal no espaço, o código transmitido é recebido pelo receptor. Comparando-se o código transmitido e a sua réplica, o receptor pode calcular o tempo de viagem do sinal. Multiplicando o tempo de viagem pela velocidade da luz (299729458 m/s) tem-se a distância entre o satélite e o receptor.

As pseudodistâncias nas portadoras L1 e L2 podem ser escritas como:

$$PD_{Rf1}^S = \rho_r^S + c[dt_r - dt^S] + I_{rf1}^S + T_r^S + b_{f1} + b^{f1} + dm_r^S + \varepsilon_{PD_r}^S, \quad (3.23)$$

e

$$PD_{Rf2}^S = \rho_r^S + c[dt_r - dt^S] + I_{rf2}^S + T_r^S + b_{f2} + b^{f2} + dm_r^S + \varepsilon_{PD_r}^S, \quad (3.24)$$

onde:

PD - pseudodistância;

$\rho_r^S$  - distância geométrica entre satélite e receptor;

c - velocidade da luz no vácuo;

$t_r$  e  $t^S$  - tempo registrado no receptor e no satélite, respectivamente;

$dt_r$  e  $dt^S$  - erro do relógio no receptor e no satélite, respectivamente;

$I_{rf}^S$  e  $T_r^S$  - refração ionosférica e troposférica, respectivamente;

$b_f$  e  $b^f$  - atrasos instrumentais do receptor e do satélite, respectivamente;

dm - efeitos de multicaminho;

$\varepsilon_{PD_r}^S$  - erro da medida da pseudodistância.

Sabendo que as Equações (3.21) e (3.22) com relação a L1 e L2 é dado por:

$$I_{r(1,2)}^S = \pm \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (3.25)$$

Diminuindo (3.23) de (3.24) obteve-se:

$$PD_{Rf1}^S - PD_{Rf2}^S = I_{rf1}^S - I_{rf2}^S + b_{f1} - b_{f2} + b^{f1} - b^{f1}. \quad (3.26)$$

e substituindo (3.25) foi obtido:

$$PD_{Rf1}^S - PD_{Rf2}^S = \frac{40,3}{f_1^2} TEC - \frac{40,3}{f_2^2} TEC + b_{rf1} - b_{rf2} + b_{f1}^S - b_{f1}^S. \quad (3.27)$$

Sendo que:  $(b_{rf1} - b_{rf2}) = DCB_r$ ;  $(b_{f1}^S - b_{f2}^S) = DCB^S$ .

onde  $DCB_r$  e  $DCB^S$  são os atrasos instrumentais devido o receptor e o satélite, respectivamente.

Finalmente, a Equação 3.27 pode ser reorganizada e escrita da forma da Equação 3.28.

$$PD_{Rf1}^S - PD_{Rf2}^S = 40,3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) TEC + DCB_r + DCB^S. \quad (3.28)$$

Portanto, o TEC então pode ser obtido somente isolando-o na Equação 3.29:

$$TEC = \frac{(PD_{Rf1}^S - PD_{Rf2}^S) - (DCB_r + DCB^S)}{40,3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}. \quad (3.29)$$

### 3.2.3 Cálculo do TEC a partir da fase da portadora

Outra medida dos intervalos entre o satélite e o receptor pode ser obtida por meio da fase da portadora. A distância entre o satélite e o receptor possui um número desconhecido de ciclos inteiros mais a fração do ciclo medido. Um receptor de GPS não tem meios para distinguir um ciclo de outro. Em outras palavras, ele não é capaz de determinar o número de ciclos completos entre o satélite e o receptor. O

que é medido é a fração de ciclo, enquanto que o número inicial de ciclos completos permanece desconhecida ou ambígua. Felizmente, o receptor tem a capacidade de se lembrar das mudanças de fase após a ignição, de modo que a ambiguidade inicial do ciclo permanece inalterada ao longo do tempo, desde que não haja atenuantes ou a perda do sinal (MONICO, 2008).

As Equações 3.30 e 3.31 referem-se à fase portadora num determinado instante  $t$ .

$$\phi_{rf1}^S = \rho_r^S + c(dt_r - dt^S) + I_{rf1}^S + T_r^S + b_{rf1} + b_{f1}^S + \lambda_{f1}N + \varepsilon_{\phi_r}^S, \quad (3.30)$$

$$\phi_{rf2}^S = \rho_r^S + c(dt_r - dt^S) + I_{rf2}^S + T_r^S + b_{rf2} + b_{f2}^S + \lambda_{f2}N + \varepsilon_{\phi_r}^S, \quad (3.31)$$

Sendo:

$\phi_r^S$  - fase da onda nas portadoras L1 e L2;

$\lambda_f$  - comprimento de onda nas portadoras L1 e L2;

$N$  - ambiguidade da fase.

Fazendo uma menos a outra, obtém-se:

$$\phi_{rf1}^S - \phi_{rf2}^S = I_{rf1}^S - I_{rf2}^S + b_{rf1} - b_{rf2} + b_{f1}^S - b_{f2}^S + \lambda_{f1}N - \lambda_{f2}N. \quad (3.32)$$

Utilizando a mesma relação da Equação 3.25, tem-se:

$$\phi_{rf1}^S - \phi_{rf2}^S = 40,3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) TEC + b_r^\phi + b^\phi + \lambda_{f1}N - \lambda_{f2}N. \quad (3.33)$$

Sendo que:  $(b_{rf1} - b_{rf2}) = b_r^\phi$ ;  $(b_{f1}^S - b_{f2}^S) = b^\phi$ .

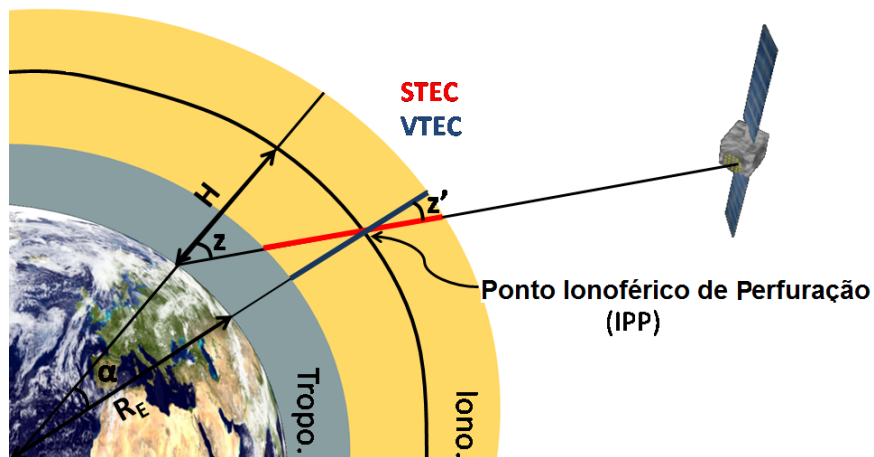
Com isso, é possível obter o TEC através da relação mostrada na Equação 3.34.

$$TEC = \frac{(\phi_{rf1}^S - \phi_{rf2}^S - b_r^\phi - b^\phi - \lambda_{f1}N + \lambda_{f2}N)}{40,3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}. \quad (3.34)$$

### 3.2.4 Obtenção do TEC vertical

Pode-se obter o TEC através de medidas de trajetórias oblíquas do sinal satélite-receptor, denominado de TEC inclinado (do inglês “slant Total Electron Content” - STEC). O TEC projetado na vertical (do inglês “Vertical Total Electron Content” - VTEC) pode ser obtido através do STEC, como mostrado na Figura 3.3 (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994).

Figura 3.3 - TEC vertical, apresentado geometricamente.



Fonte: Adaptada de ROB (2017).

O TEC vertical pode ser obtido da relação

$$VTEC = TEC \times \cos(z'), \quad (3.35)$$

onde:  $z'$  - ângulo zenital no ponto ionosférico, dado pela Equação 3.36:

$$z' = \text{sen}^{-1} \left[ \left( \frac{R_E}{R_E + H} \right) \text{sen}(z) \right]. \quad (3.36)$$

em que os parâmetros significam:

$R_E$  - raio terrestre;

$H$  - altura média do pico de densidade eletrônica da ionosfera;

$z$  - ângulo zenital do satélite.

Para facilitar, de agora em diante o termo VTEC será chamado de TEC.

### 3.3 Métodos de Cálculo do TEC

Nesse trabalho serão utilizadas três técnicas para determinar o TEC, são elas a técnica de Otsuka et al. (2002), modificada por Monico; a técnica de Seemala e Valladares (2011) e a técnica de Ciraolo et al. (2007). Estas três técnicas são largamente utilizadas e se mostram bastante eficientes para o uso nas regiões do Japão (Otsuka, sem a modificação feita por Monico), dos EUA (Seemala) e da Europa (Ciraolo). Todas serão descritas com mais detalhes na Subseção 3.3.1, Subseção 3.3.2 e Subseção 3.3.3.

A princípio foram obtidos os arquivos (do inglês “Receiver Independent Exchange Format” - RINEX), que é um formato padrão de dados do sistema de navegação, para o ano de 2015, para as estações de Cachoeira Paulista (CHPI) e São Luís (SALU). Em seguida foram obtidos os métodos de cálculos de Seemala e Ciraolo, que foram estudados para se aprender utilizá-los para executar os programas e se obter o TEC com os dados disponíveis das regiões de interesse.

Para o estudo da utilização do método desenvolvido por Otsuka e modificado por Monico, foram obtidos os resultados do cálculo do TEC para o ano de 2015 para as estações citadas acima. Porém, esse método vem sendo testado, após a última fase de desenvolvimento que culminará com a implementação definitiva das alterações feitas por Monico para seu uso rotineiro pelo programa do Clima Espacial e pelos pesquisadores interessados. Quando os testes foram ampliados para os anos de 2008 e 2009, foram observadas divergências, detectando-se, então, algumas alterações que haviam ocorrido entre versões do código no processo. Através destas verificações o grupo do Embrace foi informado das discrepâncias observadas e chegou a uma versão corrigida, com as alterações originais feitas por Monico.

Logo, com a utilização desses métodos de cálculo do TEC, foram obtidas curvas diárias para todo o ano de 2015, máximo solar, para a estação de São Luís e Cachoeira

Paulista. O mesmo foi feito para um ano com mínima atividade solar, para verificação e comparação entre os métodos também sob diferentes períodos do ciclo solar.

Com os anos de mínima atividade solar (2008-2009) e de máxima (2014-2015), foi destacada a sazonalidade para observar o que foi ocorrido nos diferentes períodos do ciclo solar, entre as duas estações utilizadas e entre técnicas. Considerando o Solstício de verão (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro), Equinócio de março (março e abril), Solstício de inverno (maio, junho, julho e agosto) e Equinócio de setembro (setembro e outubro). A sazonalidade será apresentada através da média horária dos meses correspondentes e seu respectivo desvio padrão.

Para se estudar a variabilidade do TEC obtido com as diferentes técnicas em condições perturbadas, foi dado um destaque maior para o período da tempestade geomagnética de St. Patrick ocorrida entre os dias 16 e 17 de março de 2015. Para tal análise foi também utilizado um modelo de simulação ionosférica, chamado Nequick2 (NAVA et al., 2008), que será descrito na [Seção 3.4](#). O modelo foi utilizado a critério de referência, pois ele não considera a resposta ionosférica durante tempestades geomagnéticas, mas auxilia na comparação com os resultados ao aproximar-se de como seria a variação diária do TEC sob condições normais. Para uma análise detalhada foram feitas comparações das técnicas com o modelo utilizando a correlação de Pearson.

Serão feitas também comparações entre os métodos em função da sazonalidade onde será calculada a média por ponto no tempo dos três dias mais calmos, segundo índice Kp, para Equinócios e solstícios. A resposta sazonal dos TECs calculados também será avaliada em função das duas regiões (CHPI e SALU) utilizadas.

Por fim, será testada a qualidade do TEC a ser estimada a partir da matriz de covariância do método de estimação, através do procedimento utilizado pelo grupo do laboratório INCT GNSS / NavAir da UNESP de Presidente Prudente.

As técnicas daqui em diante serão chamadas, para efeito de simplificação, pela sua instituição de origem. Dessa forma a técnica desenvolvida por Otsuka et al. (2002) e adaptada por Monico será INPE, a técnica de Seemala, será referida por BC (Boston College, Boston, EUA) e, por fim, a técnica de Ciralo será chamada de ICTP (International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy).

### 3.3.1 Técnica do INPE

Essa técnica foi desenvolvida por Otsuka et al. (2002), e adaptada no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil, pelo Dr. João Francisco Galera Monico, para uso no programa Embrace, que aqui será tratada como técnica INPE.

A obtenção do TEC absoluto é feito da seguinte forma:

1. aquisição dos dados brutos: a aquisição dos dados é feita no portal do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).
2. Correção de deslizamento: quando disponível, o RINEX do dia anterior é usado para verificar, e em seguida, corrigir no próprio arquivo.

$$R_{i,k} = \lambda \left( \frac{L1_{i,k}}{f_1} - \frac{L2_{i,k}}{f_2} * c \right). \quad (3.37)$$

onde L1 e L2 são respectivamente as observáveis do receptor, f1 e f2 são as frequências constantes em hertz: 1575,42 MHz e 1227,60 MHz, respectivamente e c corresponde à velocidade da luz no vácuo: 299792,458 km /s.

3. Cálculo relativo do TEC: o TEC relativo é calculado com base em RINEXs com a correção de deslizamento.
4. Estimativa dos Bias: o bias instrumental é estimado usando o TEC relativo e os arquivos de órbita de satélite. O método dos mínimos quadrados é usado para estimar as variáveis desconhecidas.
5. Cálculo do TEC absoluto: uma vez que os bias instrumentais foram calculados, o TEC absoluto é então gerado.
6. Cálculo do TEC vertical: o TEC vertical é a proporção entre o TEC absoluto anterior e o slant factor.

Nesta técnica utiliza-se o método dos mínimos quadrados removendo os bias instrumentais. Assim, desenvolveu-se uma auto calibração com a pseudodistância, para calcular o TEC. Para o cálculo do VTEC é necessário fazer correções das perdas de ciclos, calcular os valores de STEC a partir das medidas de fase e pseudodistância corrigindo os atrasos instrumentais do satélite (do inglês “Differential Code Bias” - DCB) dos satélites, estimar o DCB do Receptor, fazer o teste de qualidade, fator de



variância, corrigir os valores de STEC dos DCBs do receptor, converter para VTEC, e analisar se há ocorrência de TEC negativo.

Resumindo, as modificações aplicadas por Dr. João Francisco Galera foi tal que ao invés de calcular os DCBs de satélite e receptores como uma única incógnita numa estação, foram usados os DCBs dos satélites advindos do International GNSS Service (IGS) e então calculado o da estação, deixando as mesmas suposições feitas por Otsuka. Para o cálculo do TEC, foi utilizada a janela de dados menos afetada pela cintilação. Na sequência, com os DCBs da estação calculados, determina-se o STEC e VTEC para todos os satélites e instantes.

Então, segundo essa técnica, se o maior valor absoluto de VTEC negativo for menor ou igual ao desvio padrão do DCB Rec, é feito com que a todos valores de VTEC sejam adicionados ao valor absoluto do menor valor negativo. Para saber mais a respeito dessa técnica veja em [Otsuka et al. \(2002\)](#).

### 3.3.2 Técnica do BC

A técnica desenvolvida por Gopi Seemala, no Boston College, é denominada aqui como técnica BC. O TEC absoluto é obtido usando os biases do satélite publicados pela Universidade de Berna e o bias do receptor que é calculado minimizando a variabilidade de TEC ([VALLADARES et al., 2009](#)). O software desenvolvido por essa técnica é capaz de identificar automaticamente as depleções do TEC através da análise do traço de TEC para cada passagem individual do satélite.

O método BC tem como características principais a capacidade de processar muitos arquivos (RINEX) de uma vez; obtém efemérides do arquivo de navegação IGS, tem capacidade de baixar o arquivo de navegação automaticamente (se conectado a internet); é capaz de calcular o TEC a partir dos dados de observações do GPS RINEX; corrige a perda de ciclos da fase; faz a leitura dos biases de satélite dos arquivos de códigos DCB IGS, se não estiver disponível, calcula-os; calcula os bias do receptor, os biases inter-canal para diferentes satélites no receptor; traça os valores de TEC verticais na tela e grava arquivos de saída ascii no mesmo diretório de arquivos de dados.

O cálculo dos bias do receptor é feito da seguinte forma:

$$TEC = STEC + BRx + BRich + Bsat. \quad (3.38)$$

onde: BRx, BRich, Bsat são os bias do receptor, entre o receptor e a antena e do satélite, respectivamente. Para mais detalhes dessa técnica veja em [Seemala e Valladares \(2011\)](#).

### 3.3.3 Técnica do ICTP

A técnica do ICTP foi desenvolvida e é utilizada pelo International Centre for Theoretical Physics, por Luigi Ciraolo. O método de cálculo dessa técnica não difere muito das anteriores, a não ser na equação para estimar o bias do receptor de GPS.

O método utilizado por essa técnica necessita de arquivo anterior e posterior ao que se deseja calcular, então é preciso fazer download dos arquivos RINEX do dia que se quer calcular o TEC, do dia anterior e do posterior.

As soluções para calibração são: Extração do slant não calibrada das observáveis GNSS; Preprocessamento: controle de qualidade de observáveis GNSS, máscara de elevação, descontinuidades de arcos, recuperação de ciclo, etc; Solução do sistema de coeficientes VTEC desconhecidos e termos de polarização.

De acordo com a distribuição geográfica das estações e o período em que as observações estão disponíveis, são possíveis várias soluções: Por hora, dia único, dia inteiro; Estação única, regional, global.

Possíveis erros:

- Os erros variam para alguns TECU em condições normais, mas até 30-40 TECU sob tempestade, isso pode introduzir graves erros em soluções regionais e globais;
- É realizada uma solução de vários dias, evitando descontinuidades do dia a dia em slants calibradas, exceto no início e no final da solução;
- Slants (para o mesmo satélite) de receptores co-localizados não são os mesmos;
- Possível ocorrência de TECs negativos nas latitudes médias. Mais detalhes em [Ciraolo et al. \(2007\)](#).

### 3.4 Modelo NeQuick2

Esse modelo nos permite obter o TEC ao longo de qualquer trajeto terra-satélite, por integração. O modelo foi proposto por [Giovanni e Radicella \(1990\)](#) e modificado por [Radicella e Zhang \(1995\)](#).

O modelo NeQuick2 é um modelo de densidade eletrônica para ionosfera, que é dependente do tempo (RADICELLA; LEITINGER, 2001; NAVA et al., 2008). Com ele pode-se determinar a densidade em qualquer percurso do solo até o satélite e por integração numérica obtém-se o TEC. A consideração feita para representar a parte superior da ionosfera foi incluir uma camada semi-Epstein, sendo que o parâmetro de espessura depende da altura. Para esse modelo são utilizados três pontos de fixação de perfil: topo da região E, topo da região F1 e F2, os parâmetros ionosféricos dessas regiões são obtidos através de equipamentos de rádio-frequência, as digissondas. Mais detalhes sobre este modelo está em Nava et al. (2008).

O laboratório Rutherford-Appleton do Reino Unido adaptou o modelo para prever o TEC vertical utilizando valores de previsões dos parâmetros de frequência crítica da região F2 (foF2) e Máxima frequência utilizável (MUF) (CANDER, 2003). As modificações eram realizadas de acordo com a necessidade de fornecer melhores representações para a ionosfera em escalas globais.

Matematicamente, a densidade de uma camada de Epstein ( $N_{Epstein}$ ) é dada por Rawer (1982).

$$N_{Epstein}(h; hmax, Nmax, B) = \frac{4Nmax}{\left(1 + \exp\left(\frac{h-hmax}{B}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{h-hmax}{B}\right). \quad (3.39)$$

onde:

$Nmax$  - densidade do pico da camada;  $hmax$  - altura do pico da camada;  $B$  - parâmetro de espessura da camada;  $h$  - altura da camada.

A extremidade inferior adotada pelo NeQuick2 é expressa como a soma das camadas semi-Epstein, utilizando a Equação 3.41.

$$N_{bot}(h) = N_E(H) + N_{F1}(h) + N_{F2}(h). \quad (3.40)$$

onde:

$$N_E = \frac{4Nm^*E}{\left(1 + \exp\left(\frac{h-hmE}{BE}\xi(h)\right)\right)^2} \times \exp\left(\frac{h-hmE}{BE}\xi(h)\right), \quad (3.41)$$

$$N_{F1} = \frac{4Nm^*F1}{\left(1 + \exp\left(\frac{h-hmF1}{B1}\xi(h)\right)\right)^2} \times \exp\left(\frac{h-hmF1}{B1}\xi(h)\right), \quad (3.42)$$

$$N_{F2} = \frac{4Nm^*F2}{\left(1 + \exp\left(\frac{h-hmF2}{B2}\right)\right)^2} \times \exp\left(\frac{h-hmF2}{B2}\right). \quad (3.43)$$

Sendo:  $BE$ ,  $B1$  e  $B2$ , são parâmetros de espessura da camada com relação a camada Epstein, a região F1 e a região F2, respectivamente;

$$Nm^*E = NmE - N_{F1}(hmE) - N_{F2}(hmE),$$

$$Nm^*F1 = NmF1 - N_E(hmF1) - N_{F2}(hmF1),$$

$$\xi(h) = \exp\left(\frac{10}{1+1|h-hmF2|}\right).$$

Em que:  $NmE - 0,124(foE)^2$ ;  $NmF1 - 0,124(foF1)^2$ ;  $NmF2 - 0,124(foF2)^2$ .

Para o topo da camada, o modelo faz a representação com a camada semi-Epstein com o parâmetro de espessura dependente de  $h$  (altura):

$$N(h) = \frac{4NmF2}{(1 + \exp(z))^2} \exp(z). \quad (3.44)$$

sendo:

$$z = \frac{h-hmF2}{H},$$

Finalmente o modelo NeQuick2 usa os coeficientes ITU-R (JONES; GALLET, 1962) para calcular os valores médios de  $foF2$  e  $M(3000)F2$  e assim, obter o TEC.

Podendo portanto se obter o TEC através da integral com respeito a densidade eletrônica obtida na Equação 3.46, com a seguinte equação dada por:

$$TEC = \int N dh. \quad (3.45)$$

Por fim, os valores obtidos pelo modelo dependem da atividade solar (dada pelo número médio de manchas solares mensais R12 ou de fluxo de rádio solar F10.7), da estação, da longitude, da latitude e do tempo universal (UT). Portanto, o mesmo

não é capaz de acompanhar as variações do TEC ocasionadas por eventos transientes, mas permite a obtenção do TEC médio estimado para um determinado período, tornando-o interessante para ser usado como referência na avaliação de efeitos referentes a perturbações geomagnéticas.

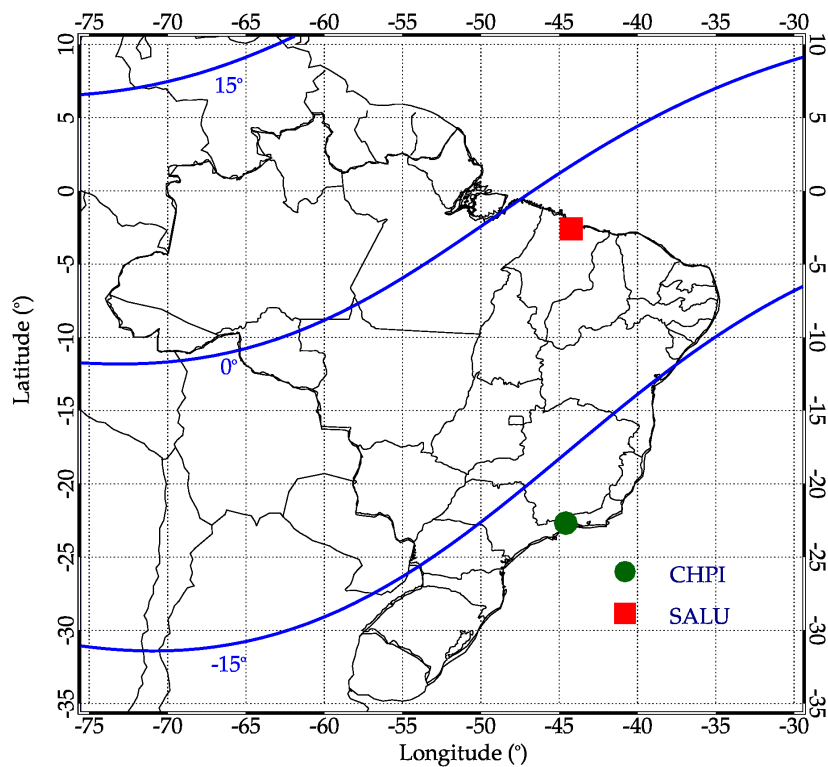


## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia de forma geral e o período de dados utilizados neste trabalho. Os dados de GPS utilizados foram obtidos pela rede RBMC/IBGE para a estação de Cachoeira Paulista (CHPI), localizada na crista da EIA, e São Luís (SALU), localizada na região equatorial.

A Figura 4.1 mostra a localização das estações que serão utilizadas neste trabalho: São Luís, MA ( $2^{\circ} 36' S$ ,  $44^{\circ} 13' O$ , DIP:  $1,3^{\circ} S$ ), na região equatorial e Cachoeira Paulista, SP ( $22^{\circ} 41' S$ ,  $44^{\circ} 59' O$ , DIP:  $16,9^{\circ} S$ ) localizada na crista da EIA. Nesta Figura 4.1 também é possível observar o equador magnético e duas curvas correspondendo às latitudes geomagnéticas  $+15^{\circ}$  e  $-15^{\circ}$  em 2015.

Figura 4.1 - Ilustração mostrando as estações que serão utilizadas neste trabalho.



## 4.1 Período de dados

Para este trabalho foram analisados um total de 1460 dias, que corresponde a um total de 8760 curvas de TEC. Após a avaliação do grau de perturbação presente em cada dia (foram considerados apenas os dias com  $kp \leq 3$ ), foram separados para compor os resultados deste estudo aproximadamente 25 % dos dias iniciais.

## 4.2 Métodos de análise

Primeiramente, e de forma independente dos dias considerados calmos, foi feita uma análise da tempestade geomagnética de St. Patrick ocorrida no dia 17 de março de 2015. Foram utilizados nesse estudo de caso os dias 5, 10 e 14 de março, considerados dias calmos, e do dia 16 ao dia 21 de março, que correspondem às três fases da tempestade, de forma a permitir o estudo da diferença de comportamento do TEC calculado pelas três técnicas em dias geomagneticamente calmos e perturbados. Para auxiliar nessa análise também foram utilizadas as curvas de TEC previstas pelo modelo NeQuick2, descrito no Capítulo 3.

Foram analisadas as correlações entre as técnicas e o modelo, as correlações entre as três técnicas, as diferenças entre as técnicas (com uma proposta de combinação entre elas), a diferença percentual entre as técnicas e, por fim, foi feito um teste de qualidade individual e independente para o TEC obtido pela técnica INPE (e BC apenas para referência).

Na análise da diferença percentual a mesma foi calculada da seguinte forma: INPE-BC:  $dp = \frac{(BC-INPE)}{INPE} \times 100$  e INPE-ICTP:  $dp = \frac{(ICTP-INPE)}{INPE} \times 100$ .

Para o cálculo do teste de qualidade utilizou-se o desvio padrão dos slant TECs que compunham o VTEC obtido de acordo com a expressão:

$$\sigma_{TEC} = \sqrt{\frac{1}{N_{TEC}} \sum_{i=1}^N (X_{TEC_i} - \bar{X}_{TEC})^2}. \quad (4.1)$$

onde:  $N_{TEC}$  é o número total de TEC para um determinado horário;  $X_{TEC_i}$  são os valores de TEC obtido para cada GPS em um determinado horário;  $\bar{X}_{TEC}$  é a média referente aos  $X_{TEC_i}$  para um determinado horário.

Na segunda parte, item 5.2, foi feita a análise da sazonalidade das curvas de TEC em um período de mínimo solar, que corresponde ao período de novembro de 2008



a outubro de 2009, e de máximo solar, de novembro de 2014 a outubro de 2015, que pertencem ao ciclo solar 24.

O TEC foi separado em: Solstício de verão (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro); Equinócio de março (março e abril); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto); e Equinócio de setembro (setembro e outubro). Para essa análise, foram considerados apenas os dias magneticamente calmos com  $K_p \leq 3$  e os TECs obtidos foram comparados por estações do ano e pela fase do ciclo solar.

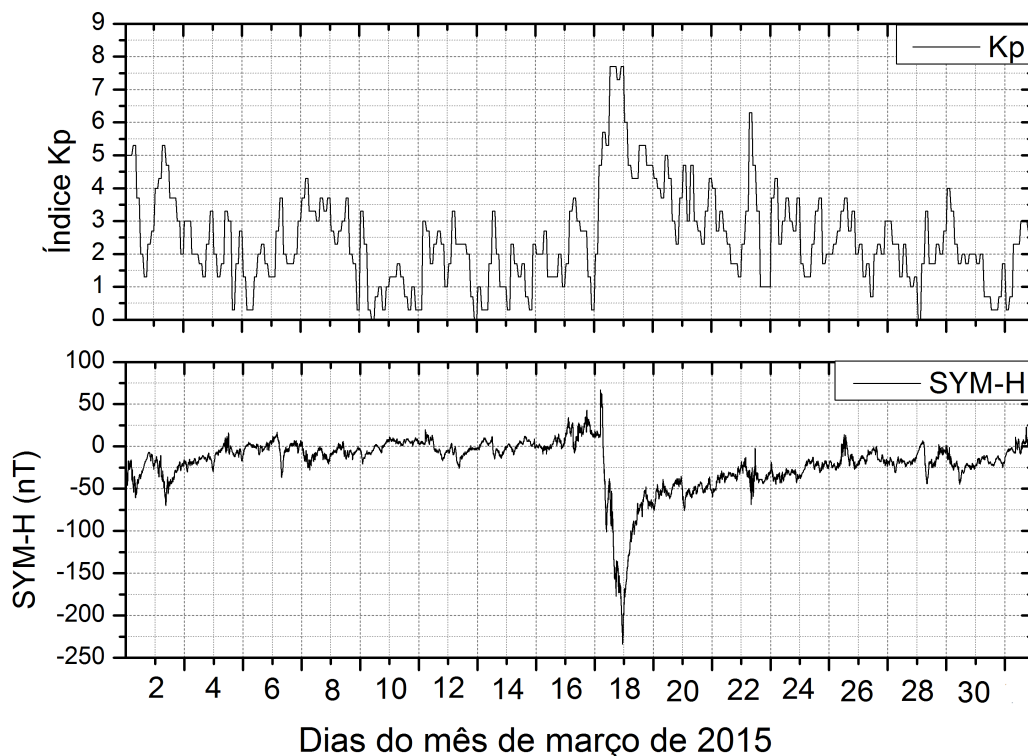


## 5 RESULTADOS

### 5.1 Análise da variabilidade diária e perturbação geomagnéticas

Uma ejeção de massa coronal foi liberada pelo Sol no dia 15 de março de 2015, alcançando o campo magnético da Terra no dia 17. Para uma análise mais detalhada dos períodos calmos e perturbados do mês de março foram utilizados os índices Kp e SYM-H, Figura 5.1.

Figura 5.1 - Índice Kp e SYM-H para o mês de março de 2015



Sabe-se que os dias considerados calmos possuem índice kp menor ou igual que três. Para analisar os dias calmos em comparação com a tempestade utilizou-se os dias 5, 10 e 14 de março.

A tempestade estudada ocorreu durante o Equinócio de março num período de alta atividade solar (2015). Podendo prever que em dias considerados calmos, a EIA irá

se desenvolver no entardecer, sendo mais efetiva, do que em outras estações do ano, como estudado por Negreti (2012).

Para uma análise detalhada da tempestade foi utilizado o dia 16 de março que marca o início do tempestade, a fase principal que foi no dia 17, e a fase de recuperação que começa no dia 18 e se perdura por mais alguns dias, analisando também os dias 19, 20 e 21.

### 5.1.1 Análise das curvas de TEC

Primeiramente para uma análise geral foi feita a média dos dias considerados calmos segundo índice Kp, dias 5, 10 e 14 de março, e plotados juntamente com os dias das fases da tempestade, do dia 16 ao dia 21 de março, isso foi feito considerando as três técnicas analisadas e as duas estações estudadas.

A fase principal da tempestade se deu no dia 17 de março, estendendo-se até o final do dia, em que o índice SYM-H atingiu aproximadamente -230 nT, iniciando, em seguida, a fase de recuperação que se entendeu até o dia 25 de março. Aqui analisa-se em detalhes o comportamento do TEC até o dia 21, quando o SYM-H atingiu -25 nT em seu retorno aos valores próximos a 0 nT.

Na Figura 5.2 e na Figura 5.3 um efeito que chama bastante atenção em relação às duas estações é que em São Luís, na fase de recuperação, a média de dias calmos se encontra abaixo do TEC, e na estação de Cachoeira Paulista de uma maneira geral, há uma diminuição do TEC na maioria dos dias da fase de recuperação em relação à média dos dias calmos, ficando mais evidente no dia 18, onde o TEC apresenta valores bem menores que a média com respeito aos demais dias, devido ao dínamo perturbado que acaba por inibir parcialmente o efeito fonte.

Figura 5.2 - Conteúdos eletrônico total vertical dos dias selecionados de março de 2015 para a estação de São Luís. A curva em azul representa o TEC médio de dias calmos (5, 10 e 14) e as curvas em verde representam o TEC vertical entre os dias 16 a 21. calculado para cada técnica estudada (INPE, BC e ICTP).

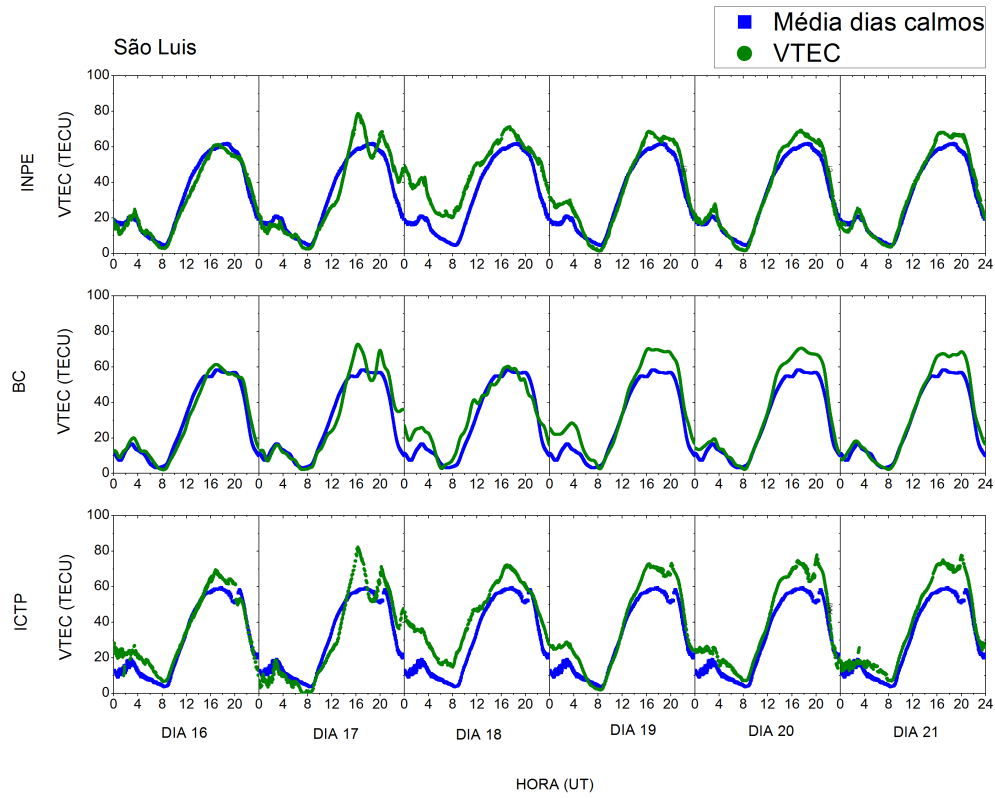
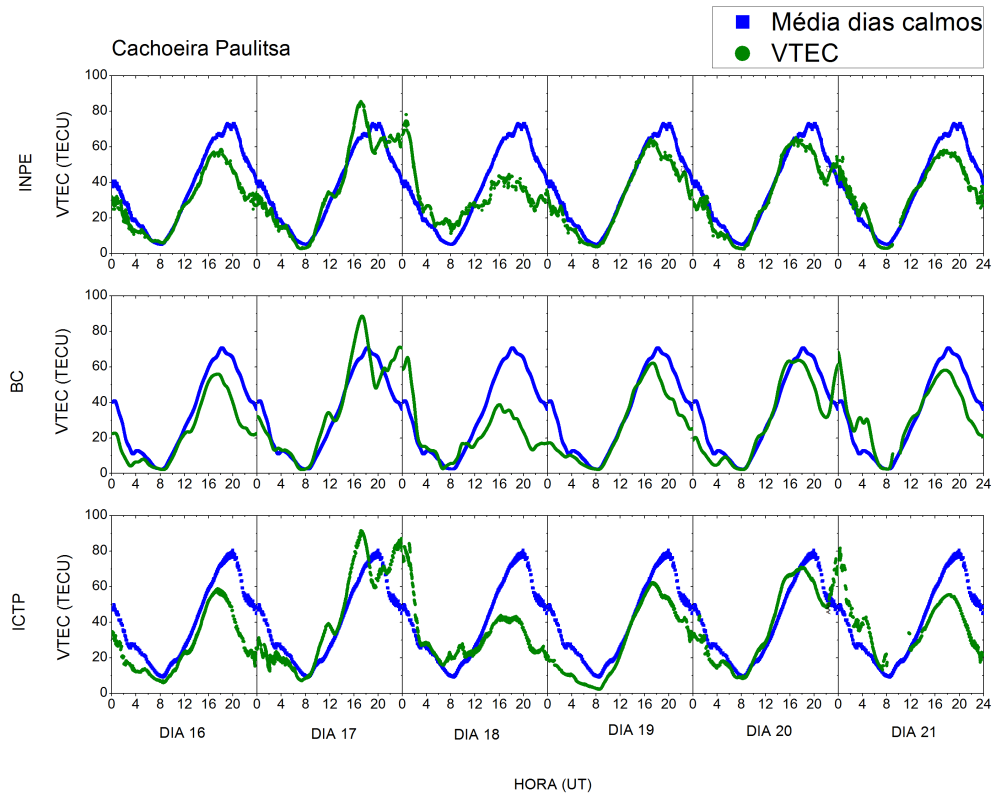


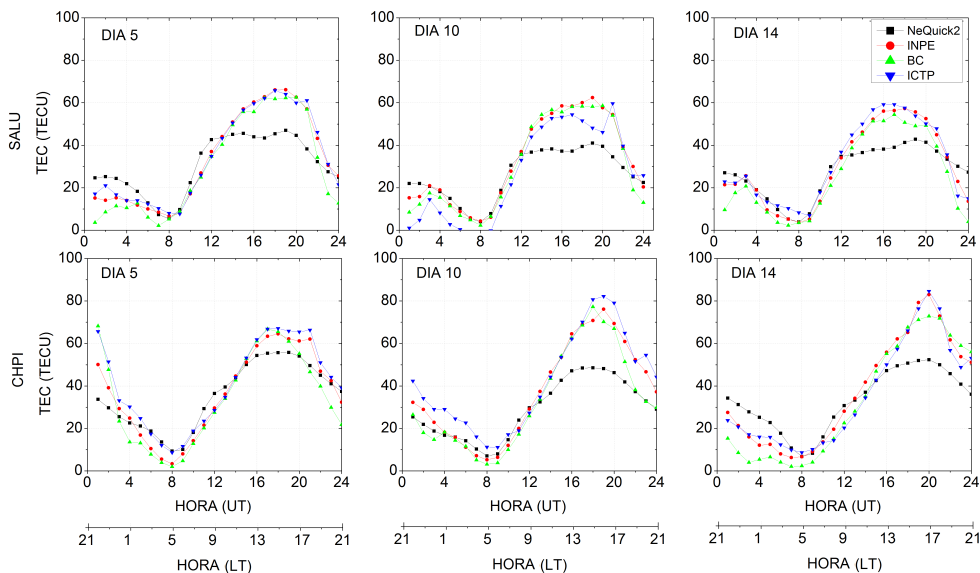
Figura 5.3 - Conteúdos eletrônico total vertical dos dias selecionados de março de 2015 para a estação de Cachoeira Paulista. A curva em azul representa o TEC médio de dias calmos (5, 10 e 14) e as curvas em verde representam o TEC vertical entre os dias 16 a 21, calculado para cada técnica estudada (INPE, BC e ICTP).



### Período calmo

A seguir é feita uma análise mais detalhada incluindo o modelo NeQuick2, cuja precisão horária é de uma hora. Para permitir a comparação, os dados das técnicas tiveram a quantidade de pontos experimentais reduzidos, de forma que o TEC vertical foi obtido através do modelo e das três técnicas para estações de São Luís (SALU) e Cachoeira Paulista (CHPI). Na Figura 5.4 são mostradas as curvas correspondentes para os três dias calmos.

Figura 5.4 - Conteúdo eletrônico total vertical previsto pelo modelo NeQuick2 e calculado pelas técnicas INPE, BC, ICTP, para três dias geomagneticamente calmos para o mês de março de 2015, para as estações de São Luís (SALU) e Cachoeira Paulista (CHPI).

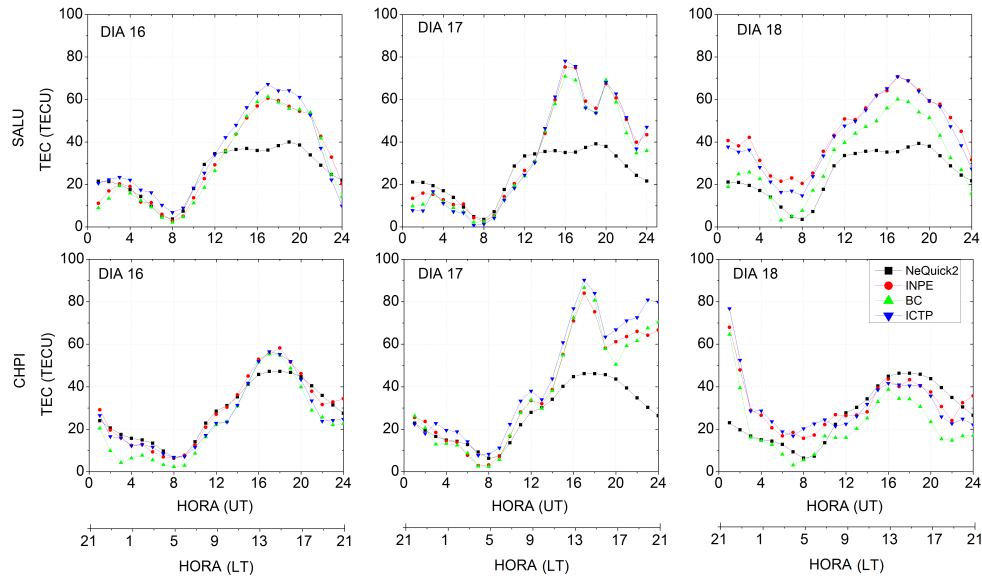


Na Figura 5.4, que apresenta apenas dias calmos, o modelo NeQuick2 e as três técnicas estudadas têm resultados muito próximos nas primeiras 12 UT, o que corresponde o período entre as 21 LT e as 9 LT, período em que o TEC tem valores baixos. No período diurno a subida do TEC observado pelos três métodos é mais forte do que a prevista pelo modelo. Em CHPI, que se encontra na crista da EIA, essa diferença no período diurno apresenta uma grande variação dia-a-dia. No dia 5 essa diferença é menor para Cachoeira Paulista do que a observada com os dados de São Luís, enquanto que nos dias 10 e 14 a diferença entre o modelo e os resultados experimentais é maior na crista da EIA.

### Período perturbado

São mostradas as curvas de TEC para as três técnicas e o modelo para os dias que correspondem ao início da tempestade geomagnética, fase principal e o início da fase de recuperação, na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Conteúdo eletrônico total vertical previsto pelo modelo NeQuick2 e calculado pelas técnicas INPE, BC, ICTP, para os três dias geomagneticamente perturbados de março de 2015, para as estações de São Luís (SALU) e Cachoeira Paulista (CHPI).



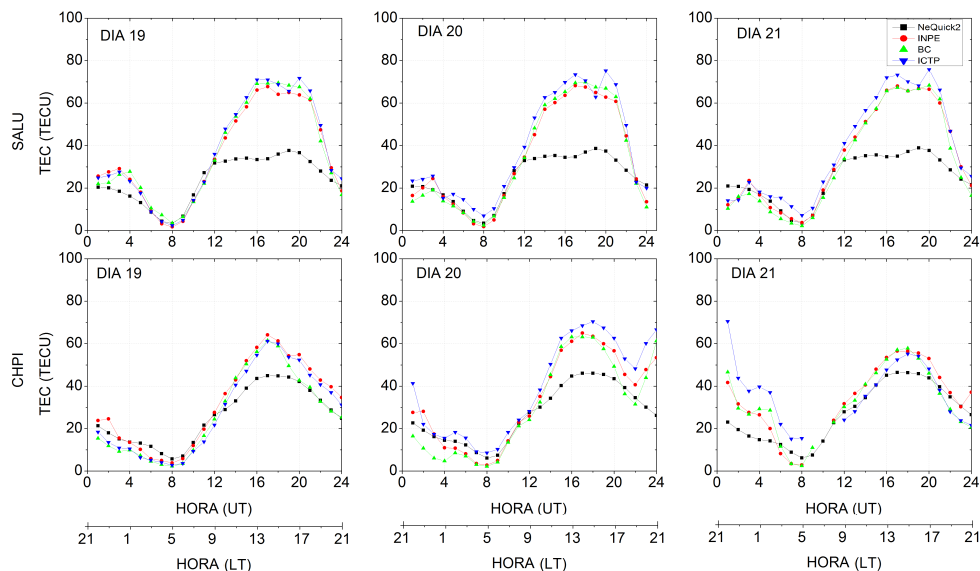
Nos dias da tempestade mostrados na [Figura 5.5](#), observa-se que enquanto a estação na região equatorial apresenta uma diferença grande entre o modelo e as técnicas em todos os dias analisados, a estação de Cachoeira Paulista apresentou pouca diferença de valores no TEC obtida pelo modelo e pelas medidas experimentais no dia 16 e no período diurno do dia 18. No dia 17, que corresponde a fase principal da tempestade geomagnética, os valores experimentais foram bem superiores aos dados pelo modelo durante o dia.

### Período da fase de recuperação

Estendendo a análise por mais três dias, observa-se o comportamento do TEC no início da fase de recuperação da tempestade, [Figura 5.6](#).



Figura 5.6 - Conteúdo eletrônico total vertical previsto pelo modelo NeQuick2 e calculado pelas técnicas INPE, BC, ICTP, para os três primeiros dias da fase de recuperação (19, 20 e 21) no mês de março de 2015, para as estações de São Luís (SALU) e Cachoeira Paulista (CHPI).



Na fase de recuperação as variações dos valores de TEC experimentais concordam com as variações do modelo na região equatorial (SALU) e em Cachoeira Paulista, porém no dia 20 em CHPI, a partir das 20 UT (17 LT) o TEC continua a descer para o modelo, enquanto que começa a subir no TEC obtido pelas técnicas. Para a estação de São Luís o modelo parece concordar bem com as técnicas em valores absolutos nas primeiras 12 UT (9 LT) dos gráficos, assim como para Cachoeira Paulista no dias 19 e 20.

### 5.1.2 Correlação do modelo NeQuick2 com respeito as técnicas

Para uma análise mais detalhada que mostre a semelhança do perfil da curva, não considerando os valores absolutos de TEC, foi feito a correlação de Pearson, pra isso os gráficos foram divididos em duas partes, entre 1 e 12 UT (22, do dia anterior, até as 9 LT) e de 13 as 24 UT (10 as 21 LT), para mostrar a correlação entre esses períodos, que pelos gráficos de TEC analisados anteriormente as curvas concordam mais durante as 12 primeiras UT em alguns casos. Faz-se necessário também obter a média da diferença entre todas as técnicas e o modelo NeQuick2, o desvio padrão

dos valores da diferença, o erro quadrático (do inglês “root mean square deviation” - RMSD), e a correlação entre modelo e técnicas. Os valores serão apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 para mais análises.

### Análise período calmo

Primeiramente será analisado a estação São Luís, para os dias 5, 10 e 14, conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick2, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 5, 10 e 14, para estação de São Luís.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-	-
Dia 5	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-3,27	10,87	11,13	0,942	0,881
Nequick2-BC	0,55	12,14	11,89	0,828	0,906
Nequick2-ICTP	-3,71	10,47	10,90	0,961	0,848
Dia 10	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-6,54	10,04	11,81	0,963	0,967
Nequick2-BC	-4,42	11,50	12,09	0,915	0,971
Nequick2-ICTP	-0,57	12,03	11,79	0,885	0,827
Dia 14	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-2,66	8,81	9,02	0,964	0,954
Nequick2-BC	1,77	10,28	10,22	0,909	0,924
Nequick2-ICTP	-4,41	9,43	10,23	0,956	0,898

A Tabela 5.1 mostra que os melhores valores da média da diferença são 0,55 TECU e 0,57 TECU, entre o modelo e a técnica BC no dia 5 e entre o modelo e a técnica ICTP no dia 10, respectivamente, isso significa que os valores se mostraram mais aproximados, pois sua média foi o menor valor possível. O valor mais discrepante ocorreu no dia 10 entre o modelo e a técnica do INPE foi obtido o valor de 6,54 TECU.

O desvio padrão da diferença representa quanto o valor da diferença variou durante aquele dia. Se seu valor for alto, é porque foi obtida uma grande variação no decorrer do dia, e se o valor for baixo, representa que pode ter sido quase constante (pouca

variação). Pela [Tabela 5.1](#) observou-se valores bem próximos de desvio padrão, e os menores valores ocorreram no dia 14. O valor mais discrepante foi aproximadamente 12 TECU, ocorrendo tanto no dia 5 entre o modelo e BC, e no dia 10 entre o modelo e ICTP. O RMSD também apresenta valores parecidos em todas as análises, sendo o valor mais discrepante deles entre o modelo e a técnica BC no dia 10, com valor de 12 TECU.

Foram obtidos valores muito altos para a correlação, tanto no primeiro período que corresponde às 12 UT iniciais como no segundo período que corresponde às 12 UT finais (entre 13 e 24 UT). A correlação pode apresentar valores de 0 a 1, sendo o seu melhor valor igual a 1. Pela [Tabela 5.1](#) observou-se que os valores mais discrepantes são de aproximadamente 0,8, o que não representa uma correlação baixa. A correlação mais alta que foi obtida está na segunda parte do dia, entre o modelo e BC, com 0,97.

Com essa análise observou-se que para a estação de São Luís, região equatorial, nos três dias considerados calmos, isso mostra que a tendência das curvas foram parecidas. A correlação por ter valores altos significa que a curva seguiu o mesmo padrão, mas como visto, teve casos e horários onde a variação do TEC foi significativa, com a maior diferença na média de aproximadamente 6 TECU.

A mesma tabela foi obtida para a estação de Cachoeira Paulista para os mesmos dias, [Tabela 5.2](#).

Tabela 5.2 - Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 5, 10 e 14, para estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-	-
Dia 5	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-1,22	6,96	6,92	0,871	0,964
Nequick2-BC	1,12	11,16	10,98	0,786	0,973
Nequick2-ICTP	-5,66	9,02	10,49	0,770	0,945
Dia 10	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-8,14	9,76	12,55	0,931	0,959
Nequick2-BC	-4,17	10,27	10,89	0,951	0,974
Nequick2-ICTP	-12,84	10,55	16,48	0,738	0,863
Dia 14	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-4,06	12,68	13,06	0,871	0,913
Nequick2-BC	0,32	15,32	15,00	0,663	0,854
Nequick2-ICTP	-2,59	12,76	12,76	0,958	0,867

Na [Tabela 5.2](#), o menor valor da diferença na média foi de 0,32 TECU entre o modelo e a técnica BC no dia 14, e a maior foi de 12,84 TECU no dia 10 entre modelo e a técnica ICTP.

O maior valor obtido para o desvio padrão foi de 15,3 TECU no dia 14 entre o modelo e a técnica BC, onde a média correspondente é menor, isso significa que, apesar da média ter sido baixa, obteve-se maior variação entre as diferenças. O maior valor de RMSD corresponde à mesma diferença cuja média foi a maior, entre modelo e a técnica ICTP, no dia 10.

Foram obtidos valores de correlações menores que para a estação de São Luís, o menor deles foi de 0,66 TECU no dia 14, entre o modelo e a técnica BC, nas primeiras 12 UT. Foram observados valores mais discrepantes de correlação na maioria dos casos nas primeiras 12 UT, tendo então melhor correlação no período entre 13 e 24 UT.

### **Análise do período perturbado**

Foi realizada a mesma análise apresentada anteriormente, para o início da tempestade, fase principal e um dia de recuperação, dias 16, 17 e 18 respectivamente,

iniciando pela a estação de São Luís.

Tabela 5.3 - Valores obtidos pela diferença entre o modelo e as técnicas para a estação de São Luís.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-	-
Dia 16	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-5,34	10,35	11,45	0,926	0,841
Nequick2-BC	-3,91	11,64	12,04	0,899	0,872
Nequick2-ICTP	-8,49	11,41	14,03	0,960	0,936
Dia 17	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-9,11	15,74	17,90	0,977	0,486
Nequick2-BC	-6,76	15,02	16,18	0,951	0,627
Nequick2-ICTP	-7,96	17,57	18,95	0,909	0,436
Dia 18	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-20,00	6,33	20,94	0,943	0,868
Nequick2-BC	-7,55	8,00	10,88	0,921	0,935
Nequick2-ICTP	-17,54	7,71	19,09	0,956	0,902

Na [Tabela 5.3](#), observou-se a menor diferença na média no dia 16 entre o modelo e a técnica BC sendo seu valor de 3,9 TECU, o maior valor da média da diferença foi 20 TECU entre o modelo e a técnica do INPE no dia 18. Os maiores valores de desvio padrão foram de aproximadamente 17,5 TECU entre o modelo e ICTP no dia 17. O maior valor do RMSD foi entre o modelo e a técnica do INPE, no mesmo dia onde foi obtido a maior diferença de TEC, sendo o RMSD de 20,9 TECU.

Foram obtidos os valores mais discrepantes de correlação na segunda parte do gráfico (de 13 as 24 UT), entre o modelo e todas as técnicas no dia 17, com o valor mais discrepante sendo 0,43 TECU entre o modelo e a técnica ICTP.

A mesma análise foi feita para a estação de Cachoeira Paulista [Tabela 5.4](#).

Tabela 5.4 - Valores obtidos pela diferença entre o modelo e as técnicas para a estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-	-
Dia 16	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-0,96	4,24	4,26	0,956	0,911
Nequick2-BC	4,74	5,78	7,38	0,915	0,926
Nequick2-ICTP	1,63	5,13	5,28	0,937	0,939
Dia 17	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-11,76	14,58	18,49	0,969	0,486
Nequick2-BC	-11,06	15,83	19,04	0,968	0,406
Nequick2-ICTP	-17,18	17,43	24,22	0,898	0,332
Dia 18	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-4,40	12,35	12,87	0,606	0,702
Nequick2-BC	5,26	13,47	14,19	0,586	0,756
Nequick2-ICTP	-4,00	15,09	15,31	0,458	0,886

Na Tabela 5.4, foram obtidos os valores mais discrepantes da média da diferença exatamente no dia 17, que é o dia da fase principal da tempestade, onde seu maior valor de diferença chega a 17 TECU entre o modelo e a técnica ICTP, o maior valor de desvio padrão também estão nesse dia 17, sendo o maior deles de 17,4 TECU entre o modelo e a técnica ICTP, e como correspondência o mesmo ocorre para o RMSD, sendo o valor mais discrepante também entre o modelo e a técnica ICTP, de 24,2 TECU.

A correlação entre o modelo e as técnicas mostra valores menores no segundo período (entre 13 e 24 UT) do dia 17 e o começo do dia 18 (entre 1 e 12 UT), sendo o valor mais discrepante de 0,33 TECU entre o modelo e ICTP no dia 17.

Pode-se dizer que assim como esperado o modelo não representa bem no período onde ocorrem tempestade geomagnética.

### **Análise do período da fase de recuperação**

Na Tabela 5.5 analisou-se o período de recuperação para a estação de São Luís.

Tabela 5.5 - Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick2, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 19, 20 e 21, para estação de São Luís.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-	-
Dia 19	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-11,68	12,91	17,21	0,903	0,911
Nequick2-BC	-12,43	14,09	18,57	0,873	0,940
Nequick2-ICTP	-13,51	14,55	19,63	0,925	0,909
Dia 20	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-9,63	13,85	16,63	0,975	0,940
Nequick2-BC	-9,66	15,52	18,01	0,969	0,957
Nequick2-ICTP	-14,36	14,64	20,29	0,971	0,921
Dia 21	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-10,04	13,41	16,53	0,930	0,912
Nequick2-BC	-8,04	14,66	16,45	0,951	0,927
Nequick2-ICTP	-13,71	14,64	19,83	0,876	0,914

Na [Tabela 5.5](#) foram obtidos valores bem maiores que os observados anteriormente para a média da diferença, sendo o menor deles de aproximadamente 8 TECU, no dia 21, entre o modelo e a técnica BC, e o maior valor da média da diferença foi de aproximadamente 14,3 TECU no dia 20 entre o modelo e a técnica ICTP. O maior valor de desvio padrão obtido foi de 15,5 TECU, entre o modelo e a técnica BC no dia 20, todos os valores de desvio padrão estiveram bem próximos, observou-se valores de 12 TECU até 15 TECU. E o maior valor de RMSD foi no dia 20 entre o modelo e a técnica ICTP onde foi obtido o maior valor da média da diferença, seu RMSD foi de 20,2 TECU.

A correlação entre o modelo e as técnicas não apresentou valores discrepantes, sendo o menor deles, de aproximadamente 0,87, no dia 19 entre o modelo e a técnica BC e no dia 21 entre o modelo e a técnica ICTP, e nos dois casos nas primeiras 12 UT.

As diferenças entre técnicas e o modelo Nequick2 na fase de recuperação para Cachoeira Paulista estão mostrados na [Tabela 5.6](#).

Tabela 5.6 - Diferença entre técnicas e o modelo NeQuick2, com sua respectiva média, desvio padrão, RMSD e a correlação entre modelo e técnicas, para os dias 19, 20 e 21, para estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-	-
Dia 19	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-5,64	7,20	9,03	0,946	0,971
Nequick2-BC	-0,80	7,25	7,15	0,974	0,910
Nequick2-ICTP	-2,26	7,56	7,74	0,969	0,972
Dia 20	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-6,72	9,22	11,25	0,929	0,743
Nequick2-BC	-3,43	11,72	11,97	0,906	0,504
Nequick2-ICTP	-12,38	11,19	16,53	0,856	0,556
Dia 21	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação (1 às 12UT)	Correlação (13 às 24UT)
Nequick2-INPE	-4,73	7,51	8,74	0,847	0,946
Nequick2-BC	-4,39	7,90	8,89	0,790	0,940
Nequick2-ICTP	-6,49	13,97	15,13	0,551	0,973

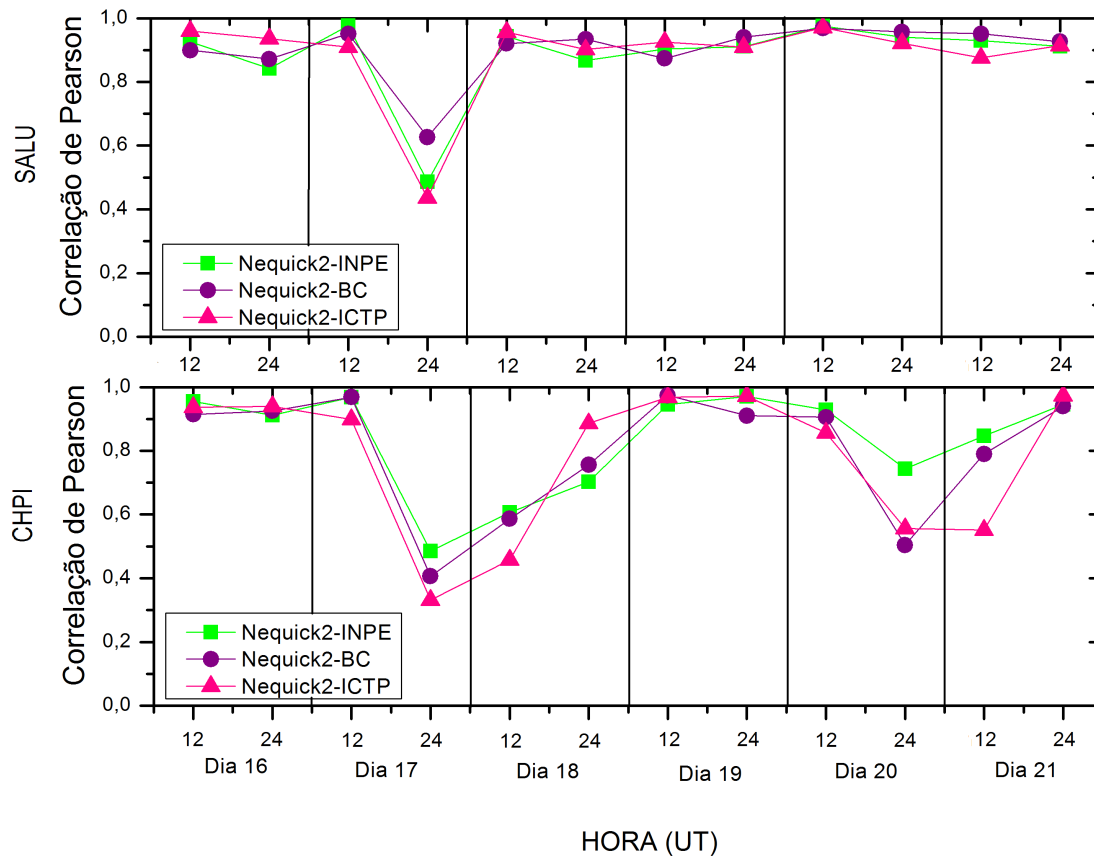
Na Tabela 5.6 foi obtido o maior valor da média da diferença no dia 20 entre o modelo e a técnica ICTP, seu valor foi de 12,3 TECU de diferença, o maior desvio padrão foi de 13,97 TECU no dia 21 também entre o modelo e a técnica ICTP. Os maiores valores de RMSD foram para a mesma diferença, entre modelo e a técnica ICTP, nos dias 20 e 21, com valores de 16,5 TECU e 15,1 TECU respectivamente.

A correlação possui seus valores mais discrepantes na segunda parte do dia 20 (de 13 as 24 UT), entre o modelo e às técnicas tanto BC como ICTP, isso ocorre também no dia seguinte, 21, nas primeiras 12 UT, também entre o modelo e a técnica ICTP, sendo os valores mais discrepantes de aproximadamente 0,5.

Para uma visualização mais ampla da correlação, foi feito um gráfico considerando a fase principal e a de recuperação, Figura 5.7.



Figura 5.7 - Correlação do modelo NeQuick com relação as técnicas para estação de São Luís e Cachoeira Paulista do dia 16 a 21 de março de 2015.



Com a Figura 5.7 observou-se de forma mais ampla que foi obtido uma melhor correlação na estação de São Luís comparada com Cachoeira Paulista, como mencionado anteriormente. Pois Cachoeira Paulista ainda representa valores de correlações considerados discrepantes, 0,5, na fase de recuperação, o que não ocorre em São Luís.

As discrepâncias mais acentuadas com os valores previstos pelo modelo NeQuick2 no dia 17 eram esperadas posto que o modelo não prevê a resposta ionosférica a uma tempestade geomagnética.

Os resultados para os nove dias analisados mostraram, que mesmo nos períodos calmos, o modelo não representa adequadamente os altos valores de TEC atingidos durante o dia na ionosfera brasileira, principalmente na estação Cachoeira Paulista,

na crista sul da Anomalia de Ionização Equatorial. Foi observado também que as diferenças do TEC estimados pelas três diferentes técnicas não são significativas durante os dias calmos utilizados como referência para a tempestade geomagnética. Nas próximas sessões, será analisado com mais detalhes a diferença entre as técnicas.

### **5.1.3 Diferenças entre as técnicas**

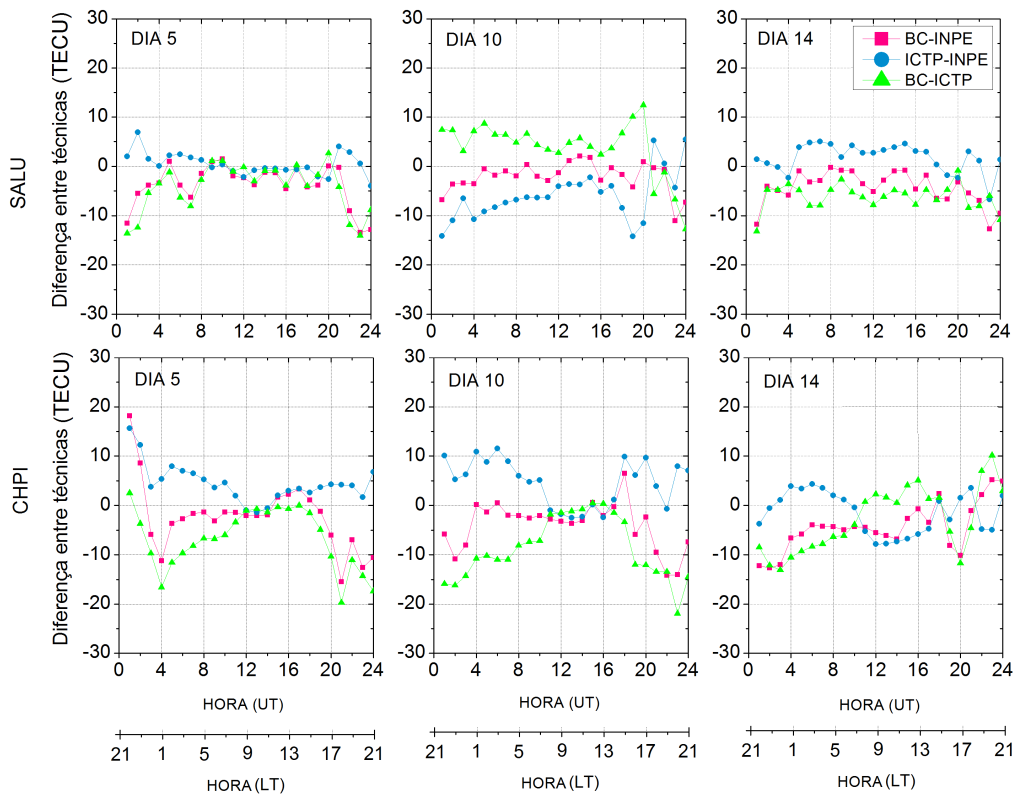
Faz-se necessário a análise detalhada das discrepâncias entre as técnicas estudadas pois, como visto anteriormente, o modelo não representa bem o comportamento do TEC durante a tempestade. Resta saber se as técnicas estão correlacionadas entre si e se o comportamento de cada uma é adequado para representar as variações do TEC no período perturbado.

#### **Análise do período calmo**

Para o período calmo, foi feita a diferença entre as técnicas, conforme visto na [Figura 5.8](#).

Na [Figura 5.8](#) observou-se que as menores diferenças estão no dia 5 para a estação de São Luís, e que São Luís teve valores de diferença menores que Cachoeira Paulista no geral. Mas é importante ressaltar que as técnicas que mais se mostraram próximas na maioria dos casos foi a BC e INPE, que é a curva representada pela cor violeta. Ela se mostra próxima a zero na maioria dos gráficos e nos casos onde ela se afasta mais do zero, todas as outras se afastam também.

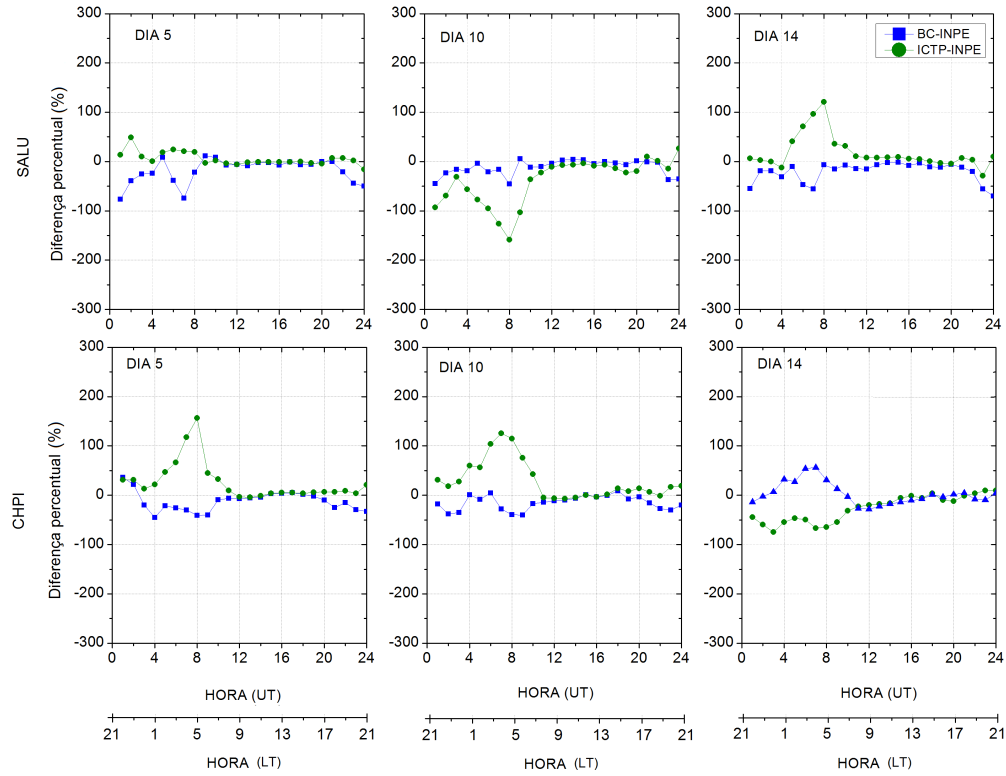
Figura 5.8 - Diferença entre técnicas para os dias 5, 10 e 14, para as estações São Luís e Cachoeira Paulista.



Fazendo uma análise mais detalhada com respeito a técnica do INPE, foi feita a diferença percentual, Figura 5.9.

Na Figura 5.9 o dia 14 na estação de Cachoeira paulista a técnica do INPE possui uma variação percentual com relação as demais relativamente menor com relação aos outros gráficos. Vale ressaltar também que no período de 8 UT (5 LT) obteve-se os maiores valores de diferença percentual. Isso se deve ao fato de ser onde observou-se os menores valores do gráfico de TEC que corresponde ao horário onde ocorre a menor incidência solar. Portanto se a variação, conforme mostra o gráfico anterior, não for muito grande em TECU, ainda assim a diferença percentual vai se mostrar alta por se tratar de valores muito pequenos de TEC. Nos demais horários não têm-se valores relevantes de diferença percentual.

Figura 5.9 - Diferença percentual da Técnica do INPE com respeito as demais, para os dias 5, 10 e 14, para as estações São Luís e Cachoeira Paulista.



Faz se necessário propor uma tabela com resultados relevantes para tal análise, fazendo uma tabela da média da diferença entre técnicas, o desvio padrão, o RMSD e a correlação entre as técnicas em questão; porém, aqui será necessário fazer a correlação da curva inteira, sem precisar dividir o gráfico em dois.

Para a estação de São Luís para os dias 5, 10 e 14, tem-se a Tabela 5.7, que mostra os valores médios da diferença do TEC entre as técnicas, o desvio padrão, o RMSD e a correlação entre as técnicas.

Tabela 5.7 - Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 5, 10 e 14 de março de 2015, para a estação de São Luís.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Dia 5	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-3,82	4,21	5,62	0,983
ICTP-INPE	0,44	2,32	2,32	0,995
BC-ICTP	-4,26	4,86	6,39	0,978
Dia 10	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-2,12	3,03	3,65	0,991
ICTP-INPE	-5,96	4,99	7,71	0,975
BC-ICTP	3,83	5,56	6,66	0,968
Dia 14	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-4,43	3,37	5,52	0,984
ICTP-INPE	1,75	2,83	3,28	0,989
BC-ICTP	-6,18	2,58	6,68	0,991

Na [Tabela 5.7](#) o maior valor para a média da diferença foi de 6,18 TECU no dia 14, entre as técnicas BC e ICTP, o maior valor de desvio padrão foi de 5,56 TECU entre BC e ICTP no dia 10, ou seja, não houve uma grande variação entre os valores obtidos da diferença. O RMSD de maior valor foi de 7,7 TECU entre as técnicas ICTP e INPE no dia 10.

A correlação entre técnicas se mostrou bastante eficaz, as técnicas estão bem correlacionadas, pois o menor valor observado foi de 0,968 entre BC e ICTP no dia 10.

Para a estação de Cachoeira Paulista para os dias 5, 10 e 14, foi obtida a [Tabela 5.8](#), que mostra os valores médios da diferença do TEC entre as técnicas, o desvio padrão, o RMSD e a correlação entre as técnicas.

Tabela 5.8 - Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 5, 10 e 14 de março de 2015, para a estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Dia 5	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-2,34	6,92	7,16	0,950
ICTP-INPE	4,44	3,81	5,80	0,982
BC-ICTP	-6,79	6,14	9,06	0,962
Dia 10	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-3,97	4,79	6,15	0,979
ICTP-INPE	4,70	4,72	6,60	0,979
BC-ICTP	-8,68	6,26	10,62	0,963
Dia 14	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-4,39	4,89	6,49	0,985
ICTP-INPE	-1,48	4,21	4,38	0,986
BC-ICTP	-2,91	6,62	7,10	0,973

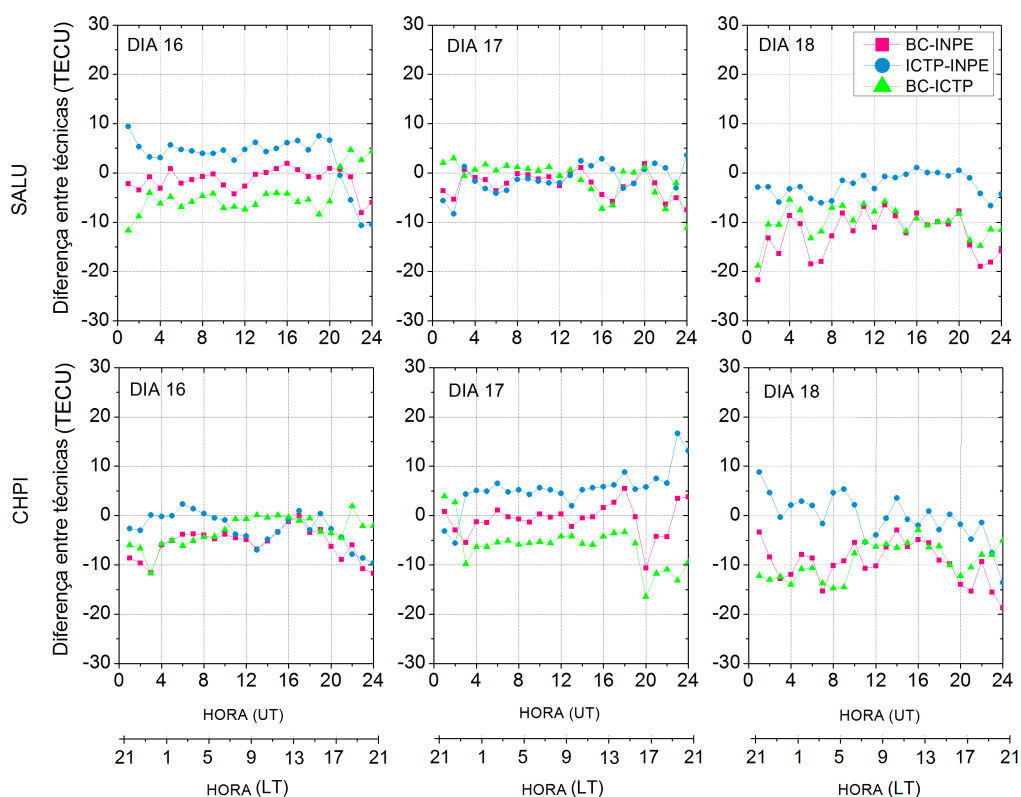
A Tabela 5.8 possui o maior valor da média da diferença entre as técnicas BC e ICTP no dia 10, de 8,67 TECU; o maior desvio padrão foi de 6,91 TECU na diferença entre BC e INPE, no dia 5; e o maior valor de RMSD para o correspondente do maior valor da média da diferença, entre BC e ICTP no dia 10, com valor de 10,6 TECU. As técnicas aqui também se mostraram bem correlacionadas sendo o menor valor de 0,950 e o maior de 0,986, para os casos entre a técnica BC e INPE no dia 5 e entre ICTP e INPE, no dia 14, respectivamente.

### Análise do período perturbado

Para os dias 16, 17 e 18 de março foi feita uma análise mais detalhada da diferença entre técnicas. Foi obtido um gráfico da diferença horária entre elas, para São Luís e Cachoeira Paulista, respectivamente.

Na Figura 5.10 foi obtida a diferença entre técnicas para as duas estações estudadas nos dias 16, 17 e 18 de março de 2015. Nota-se no dia 18 que observou-se as maiores diferenças entre técnicas, o que enfatiza o que foi dito anteriormente. Com a análise da tabela, foi obtido que na estação de São Luís, no dia 18, essas diferenças são bem maiores que as demais e ocorre durante todo o dia, entretanto nos dias 16 e 17 na estação de São Luís, foram obtidos os menores valores de diferença, se destacando mais a diferença entre BC e INPE que se mostra mais próxima à zero.

Figura 5.10 - Diferença entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís.

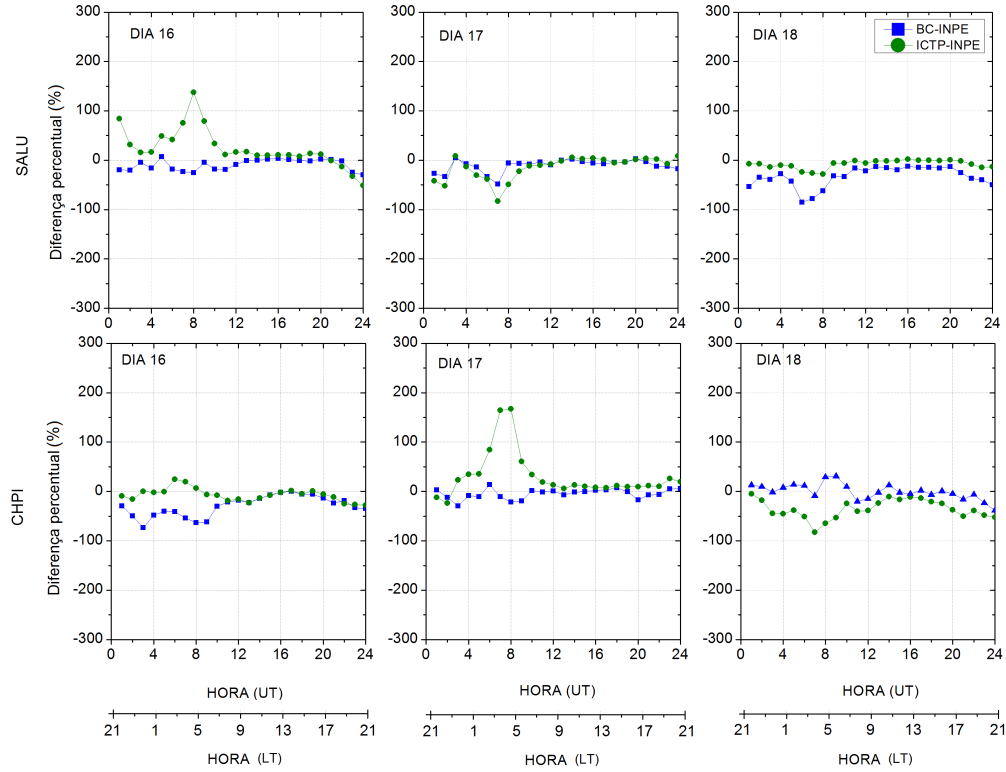


Em uma análise geral, nas duas estações e em todos os dias, os maiores valores da diferença se encontram, na maioria dos casos, na madrugada, das 0 às 4 UT e das 10 às 24 UT, onde normalmente são observados menores valores de TEC.

No final do dia 17 e início do dia 18 de março, na estação de Cachoeira Paulista, as diferenças se mostraram mais significativas, pois é onde ocorre a fase principal da tempestade, destacando-se nesse caso, que pela diferença entre as técnicas, as que mostram mais similares foram BC e INPE.

Fazendo uma análise mais detalhada com respeito a técnica do INPE, foi feita a diferença percentual, [Figura 5.11](#).

Figura 5.11 - Diferença percentual entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís



Na Figura 5.11 destaca-se o fato mencionado anteriormente, que as técnicas BC e INPE se mostram mais semelhantes, com sua diferença sendo menor que as demais, curva em azul, porém no dia 16 em São Luís e no dia 17 em Cachoeira Paulista e São Luís há um aumento significativo na curva da diferença da técnica ICTP e INPE, pois é nesse horário de 8 UT (5 LT) que observa-se o menor valor de TEC, mas como visto na curva da diferença em unidades de TEC, esse valor não é relevante.

Para a estação de São Luís para esse período tem-se a Tabela 5.9, que mostra os valores médios da diferença do TEC entre as técnicas, o desvio padrão, o RMSD e a correlação entre as técnicas.



Tabela 5.9 - Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de São Luís.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Dia 16	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-1,43	2,34	2,70	0,995
ICTP-INPE	3,14	5,079	5,88	0,969
BC-ICTP	-4,57	4,02	6,03	0,981
Dia 17	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-2,35	2,45	3,36	0,995
ICTP-INPE	-1,15	2,85	3,02	0,996
BC-ICTP	-1,20	3,58	3,71	0,993
Dia 18	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-12,45	4,34	13,15	0,972
ICTP-INPE	-12,45	2,31	3,34	0,995
BC-ICTP	-9,98	3,15	10,45	0,984

Na [Tabela 5.9](#) notamos que os piores valores ocorrem no dia 18 de março, que é quando começa a fase de recuperação, onde a maior média da diferença foi de 12,4 TECU entre BC-INPE e ICTP-INPE, o maior valor de RMSD foi de 13,15 TECU entre BC e INPE no dia 18. A correlação entre as técnicas se manteve boa, apresentando sempre valores maiores que 0,9.

No dia da fase principal da tempestade, ocorrida no dia 17 de março, as técnicas se mostram com comportamentos bem semelhantes, será apresentado com maiores detalhes mais adiante no gráfico da diferença entre elas.

Para a estação de Cachoeira Paulista para esse período, foi obtida a [Tabela 5.9](#), que mostra os valores médios da diferença do TEC entre as técnicas, o desvio padrão, o RMSD e a correlação entre as técnicas.

Tabela 5.10 - Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Dia 16	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-5,70	3,10	6,46	0,985
ICTP-INPE	-2,59	3,26	4,11	0,981
BC-ICTP	-3,11	3,01	4,28	0,988
Dia 17	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-0,70	3,34	3,34	0,992
ICTP-INPE	5,43	4,26	6,84	0,991
BC-ICTP	-6,13	4,38	7,48	0,988
Dia 18	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-9,66	4,10	10,46	0,958
ICTP-INPE	-0,40	4,72	4,64	0,935
BC-ICTP	-9,26	3,53	9,89	0,966

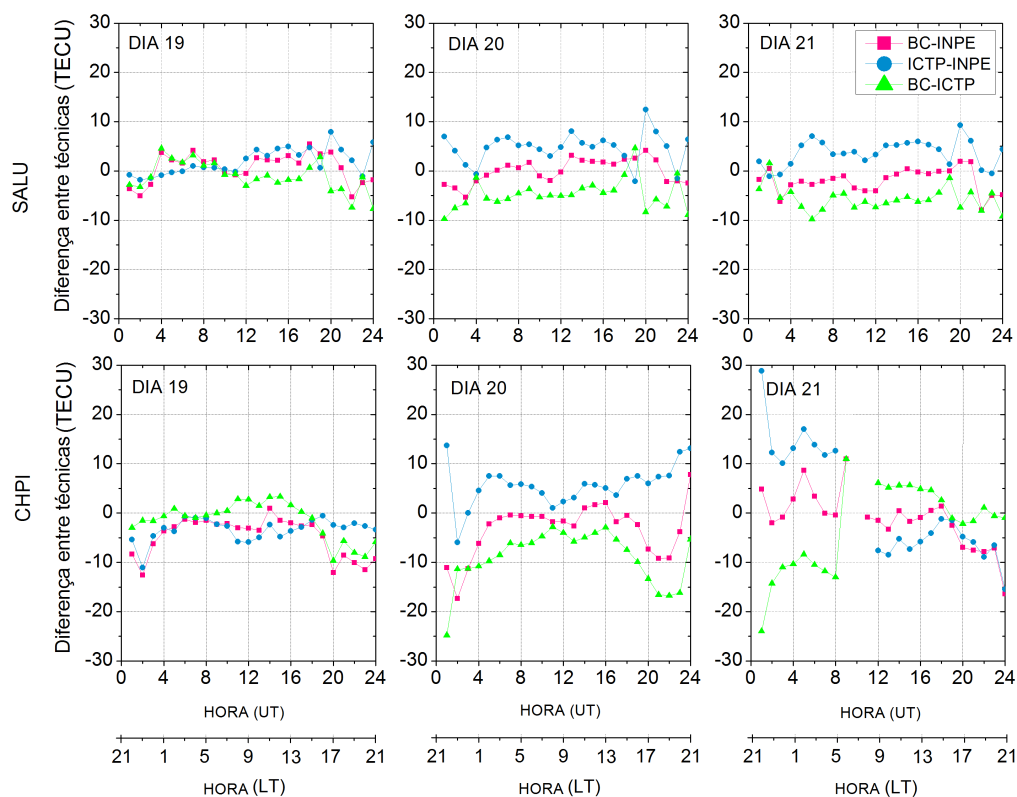
Na Tabela 5.10, também tem-se os valores mais significativos no dia 18, início da fase de recuperação, assim como ocorreu em São Luís, sendo o maior valor da média de 9,6 TECU entre BC e INPE e 9,2 TECU entre BC e ICTP. O desvio padrão manteve seus valores bem aproximados entre todas as técnicas e para todos os dias, variando de 3,0 TECU até 4,7 TECU. E o maior valor para o RMSD foi de 10,4 TECU entre BC e INPE no dia 18.

A correlação se mostrou bastante efetiva entre todas as técnicas. Seu menor valor foi de 0,93, o que significa que todas as técnicas se comportaram de forma similar.

### **Análise do período da fase de recuperação**

A fase de recuperação compreende os dias 19, 20 e 21 de março de 2015, foi feita uma análise mais detalhada da diferença, mostrado em um gráfico da diferença entre técnicas, Figura 5.12.

Figura 5.12 - Diferença entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís.

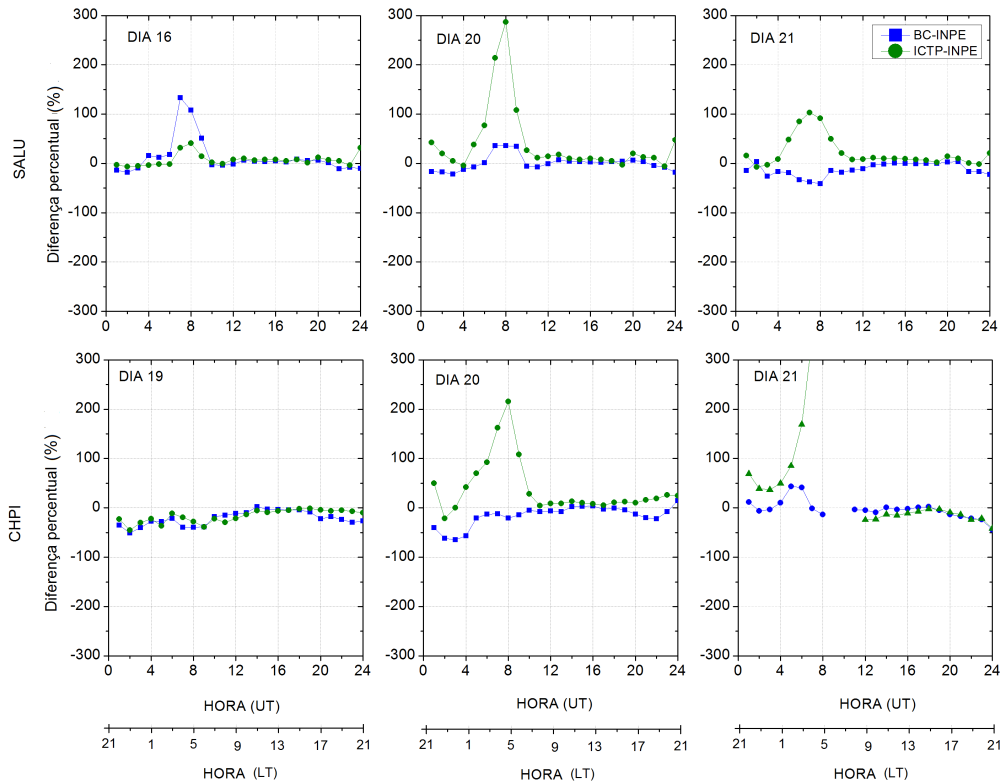


Na Figura 5.12 pode-se ver que de uma forma geral as técnicas que se assemelham mais foram a BC e a INPE. Como notado para os dias analisados anteriormente, elas também se aproximam de zero.

Os dias 20 e 21 para a estação de Cachoeira Paulista foram os que apresentaram os valores mais altos de diferença, chegando a quase 30 TECU no início dos dois dias nas diferenças, ICTP e INPE e BC e ICTP, sendo portanto a técnica mais discrepante das demais a ICTP.

Para uma análise mais detalhada com respeito a técnica do INPE, foi obtida a diferença percentual, Figura 5.13.

Figura 5.13 - Diferença percentual entre técnicas para estação de Cachoeira Paulista e São Luís.



Na Figura 5.13 tem-se um aumento significativo nas 8 UT (5 LT) nos dias 20 e 21 em São Luís e 20 em Cachoeira Paulista da diferença entre ICTP e INPE. Entre as técnicas BC e INPE, foram observados os maiores valores no mesmo horário observado anteriormente (8 UT), mas nos dias 15 em São Luís e 21 em Cachoeira Paulista. Percebe-se também no dia 19 para Cachoeira Paulista que a diferença percentual das técnicas em comparação com a técnica do INPE apresentou seus valores significativamente menores. A partir das 10 UT (7 LT) em todos os gráficos as curvas se comportaram muito bem, ou seja, houve pouca diferença percentual com relação à técnica do INPE. A diferença percentual entre às técnicas BC e INPE apresentaram mais casos de comportamentos com menos diferenças, apresentando maior similaridade.

De uma maneira geral, os métodos utilizados para o cálculo de TEC vertical

mostraram-se concordantes entre si para representar as variações do TEC total durante dias calmos e perturbados.

Para a estação de São Luís na fase de recuperação, foi feita a [Tabela 5.11](#) com a média das diferenças entre as técnicas estudadas, o desvio padrão, o RMSD e a correlação entre elas.

Tabela 5.11 - Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 19, 20 e 21 de março de 2015, para a estação de São Luís.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Dia 19	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	0,75	2,96	3,00	0,992
ICTP-INPE	1,83	2,64	3,17	0,996
BC-ICTP	-1,08	3,06	3,18	0,992
Dia 20	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	0,04	2,43	2,38	0,997
ICTP-INPE	4,73	3,19	5,67	0,991
BC-ICTP	-4,69	3,08	5,58	0,993
Dia 21	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-2,00	2,46	3,13	0,996
ICTP-INPE	3,67	2,65	4,49	0,994
BC-ICTP	-5,67	2,43	6,15	0,995

Na [Tabela 5.11](#) são mostrados valores significativamente pequenos para média, desvio e RMSD, e em todos os casos a correlação permaneceu alta. Observou-se portanto a maior média da diferença com 5,6 TECU entre BC e ICTP. O desvio padrão nos mostra que os resultados da diferença não variaram muito com relação aos demais em comparação com os dias analisados anteriormente.

Para a estação de Cachoeira Paulista na fase de recuperação, foi feita uma tabela com a média das diferenças entre as técnicas estudadas, o desvio padrão, o RMSD e a correlação entre elas.

Tabela 5.12 - Média da diferença entre técnicas, desvio padrão com respeito a diferença entre técnicas, RMSD da diferença e Correlação entre técnicas, para os dias 19, 20 e 21 de março de 2015, para a estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Dia 19	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-4,84	3,93	6,18	0,981
ICTP-INPE	-3,38	2,27	4,05	0,994
BC-ICTP	-1,46	3,78	3,98	0,983
Dia 20	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-3,29	5,37	6,21	0,973
ICTP-INPE	5,66	4,17	6,98	0,984
BC-ICTP	-8,96	5,42	10,41	0,972
Dia 21	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-1,18	5,74	5,73	0,948
ICTP-INPE	1,67	11,25	10,87	0,733
BC-ICTP	-2,85	8,80	8,86	0,853

Na [Tabela 5.12](#) para a estação de Cachoeira Paulista, é perceptível que essa estação obteve valores mais diferentes entre as técnicas do que o mesmo período para a região equatorial. A maior média da diferença foi de 8,9 TECU no dia 20 entre BC e ICTP. Os valores mais significativos estão no dia 21, onde o desvio padrão apresentou o maior valor, sendo de 11,2 TECU entre ICTP e INPE, o RMSD apresentou maior valor para a mesma diferença, sendo de 10,8 TECU e correspondendo a eles, o menor valor de correlação foi de 0,73, ou seja, no dia 21 a diferença entre técnicas que menos mostraram semelhanças foi a ICTP e INPE.

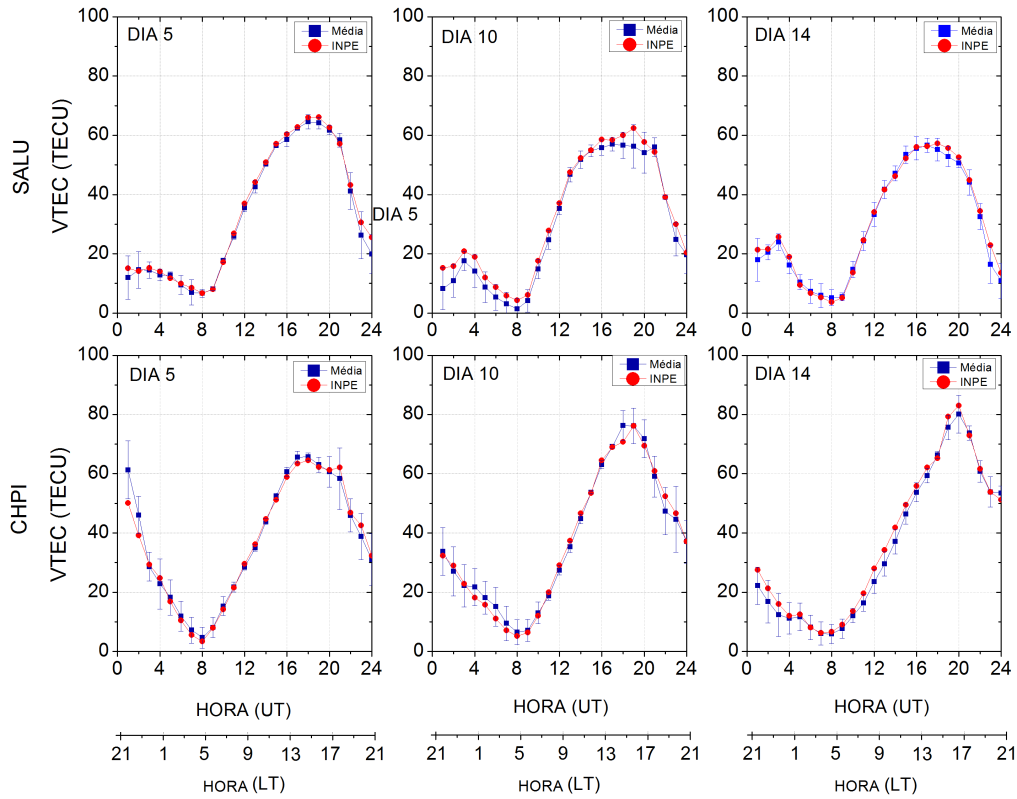
#### 5.1.4 Combinação das técnicas

Considerando-se as diferenças, mesmo que pequenas, entre as técnicas, foi proposto nesta seção a análise da combinação linear dos resultados de TEC para as três técnicas.

##### Análise do período calmo

Pode-se, então, combinar as três técnicas e obter o desvio padrão com relação a elas. A [Figura 5.14](#) mostra a combinação entre as três técnicas. Foi feita uma média entre as três, representado pela curva azul, com seu respectivo desvio padrão, mostrado pela barra no gráfico e, em vermelho, está representada a curva de TEC calculado pela técnica do INPE para os dias considerados calmos: dias 5, 10 e 14 de março.

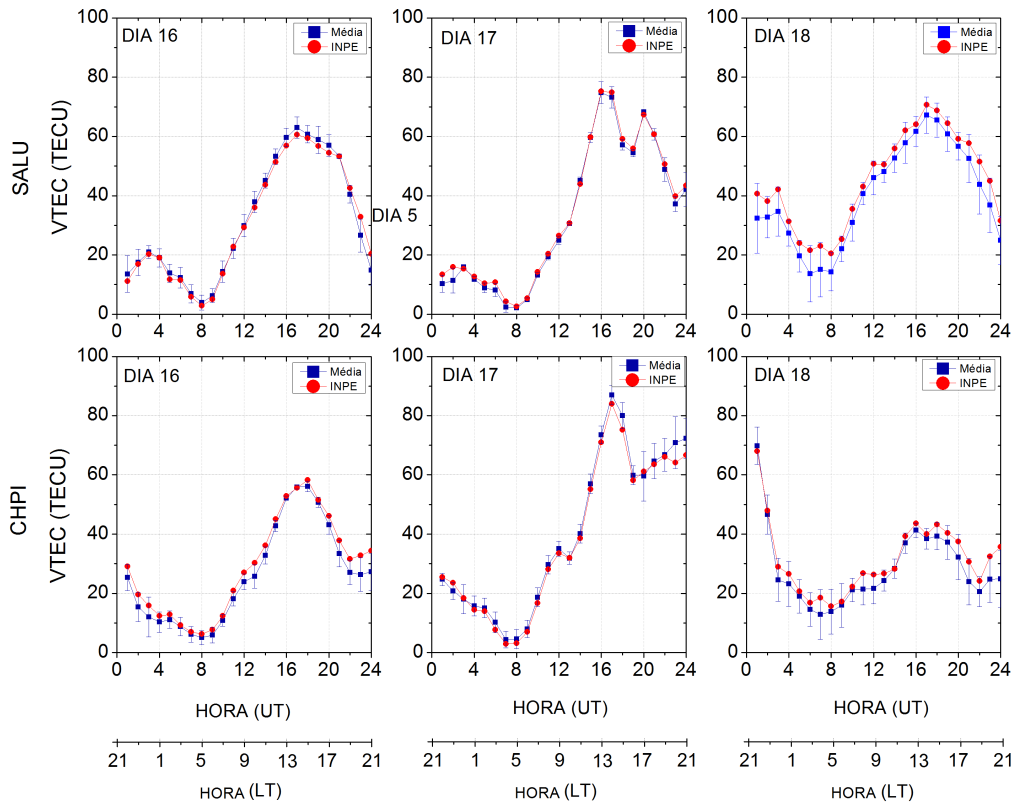
Figura 5.14 - Combinação das técnicas INPE, BC e ICTP, representado no gráfico pela média entre elas e seu desvio padrão (azul) e a técnica do INPE (vermelho), para os dias calmos 5, 10 e 14 de março de 2015, para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).



### Análise do período perturbado

A Figura 5.15 mostra a combinação entre as três técnicas, com seu respectivo desvio padrão, mostrado pela barra no gráfico, em comparação com a curva de TEC calculado pela técnica do INPE para os dias considerado perturbados, que são os dias 16, 17 e 18 de março.

Figura 5.15 - Combinação das técnicas INPE, BC e ICTP, representado no gráfico pela média entre elas e seu desvio padrão (azul) e a técnica do INPE (vermelho), para os dias perturbados 16, 17 e 18 de março de 2015, para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).

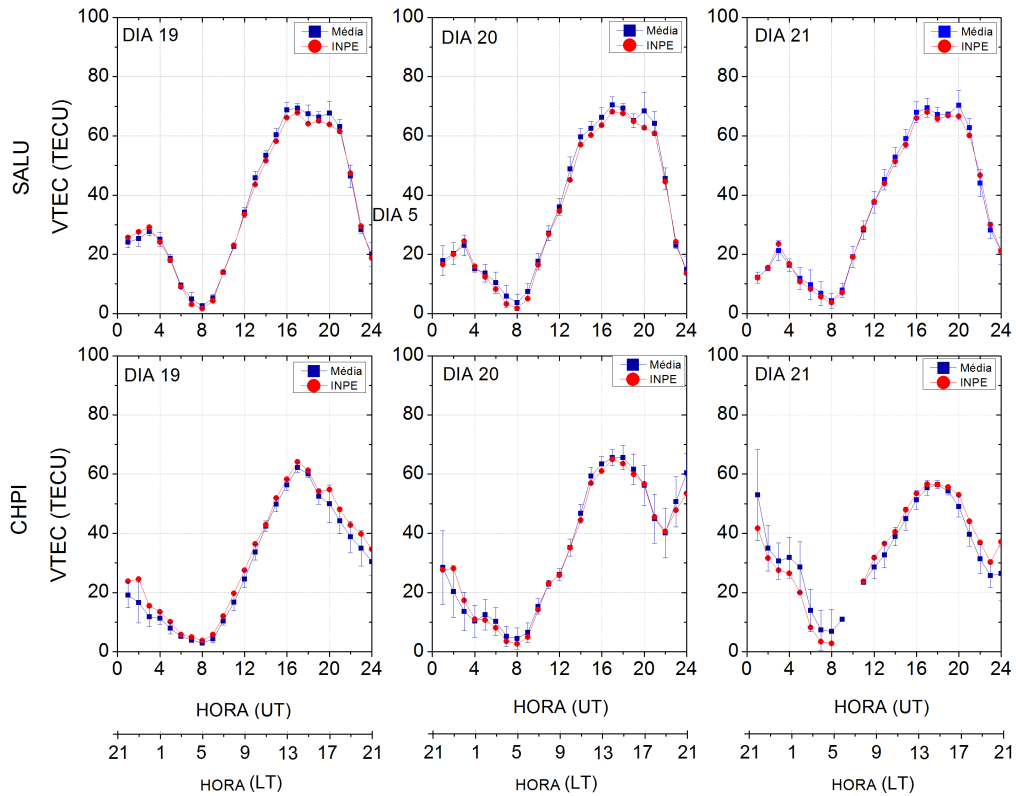


### Análise do período da fase de recuperação

A Figura 5.16 mostra a combinação entre as três técnicas, com seu respectivo desvio padrão, mostrado pela barra no gráfico, em comparação com a curva de TEC calculado pela técnica do INPE para os dias da fase de recuperação da tempestade geomagnética, que são os dias 19, 20 e 21 de março.



Figura 5.16 - Combinação das técnicas INPE, BC e ICTP, representado no gráfico pela média entre elas e seu desvio padrão (azul) e a técnica do INPE (vermelho), para os dias da fase de recuperação 19, 20 e 21 de março de 2015, para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).



Nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 tem-se a média horária das 3 técnicas para os dias estudados. Para analisar o comportamento do TEC no decorrer do dia, foi mostrado no gráfico o respectivo desvio padrão em cada horário, onde obteve-se maior variação com relação às técnicas e quais os horários onde elas se distanciaram mais, enfatizando que, como já dito anteriormente, as maiores diferenças estão, na maioria dos casos, entre as 0 e 4 UT (21 e 1 LT) e entre 20 e 24 UT (17 e 21 LT). O dia 18 apresentou maior variação entre técnicas, nas duas estações, conforme percebido pelos valores maiores do desvio desvio padrão na Figura 5.15 para ambas as estações. Percebe-se que as pequenas variações entre as técnicas podem ser amplificadas durante períodos perturbados, especialmente durante a fase principal de uma tempestade geomagnética.

### 5.1.5 Teste de qualidade para os dias selecionados

Além da comparação e análise das curvas de TEC obtidas pela técnica adotada pelo INPE e outras técnicas já utilizadas pela comunidade científica internacional, pode-se realizar um teste de qualidade dos resultados obtidos pela técnica INPE de maneira independente.

Para isso foram escolhidos os mesmos dias calmos e perturbados de março de 2015 apresentados acima. Adicionalmente, apenas para efeito comparativo dos desvios padrão obtidos, a mesma análise foi realizada para os resultados obtidos pela técnica BC no mesmo período.

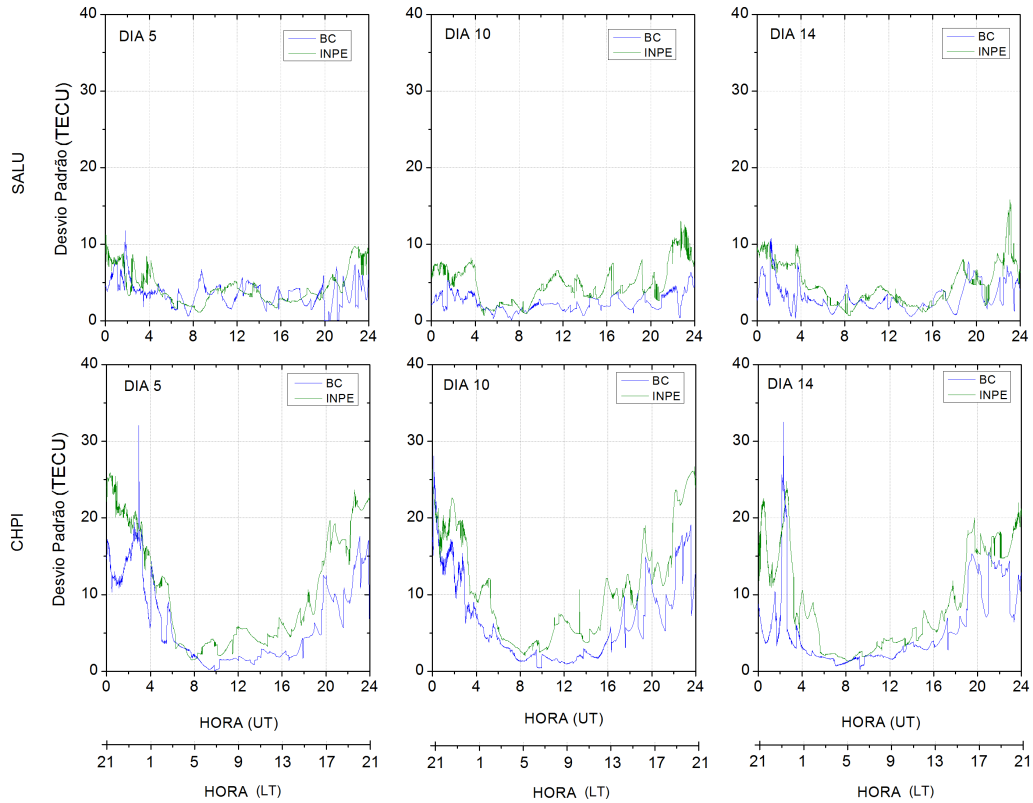
Na seção 4.2 da metodologia foi explicado o procedimento utilizado para o cálculo do teste de qualidade.

Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 é apresentado o teste de qualidade das técnicas, percebe-se que Cachoeira Paulista apresenta maiores valores de desvio padrão em relação à São Luís. Esses valores se encontram entre as 0 e 4 UT (21 e 1 LT) e entre 20 e 24 UT (17 e 21 LT). Em São Luís os maiores valores observados foram 15 TECU, com exceção do dia 17 para a técnica BC que ultrapassou os 30 TECU entre 0 e 4 UT (21 e 1 LT). Os dois testes de qualidade, tanto do INPE como do BC, representaram comportamentos semelhantes, sendo que na maior parte dos casos a técnica do INPE representa valores um pouco acima com relação à de BC.

#### **Análise do período calmo**

A Figura 5.17 mostra o teste de qualidade para estação de São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo), para os dias considerados calmos segundo índice Kp, dias 5, 10 e 14 de março de 2015, em azul está representado o teste de qualidade da técnica BC e em verde o teste de qualidade calculado segundo a técnica do INPE.

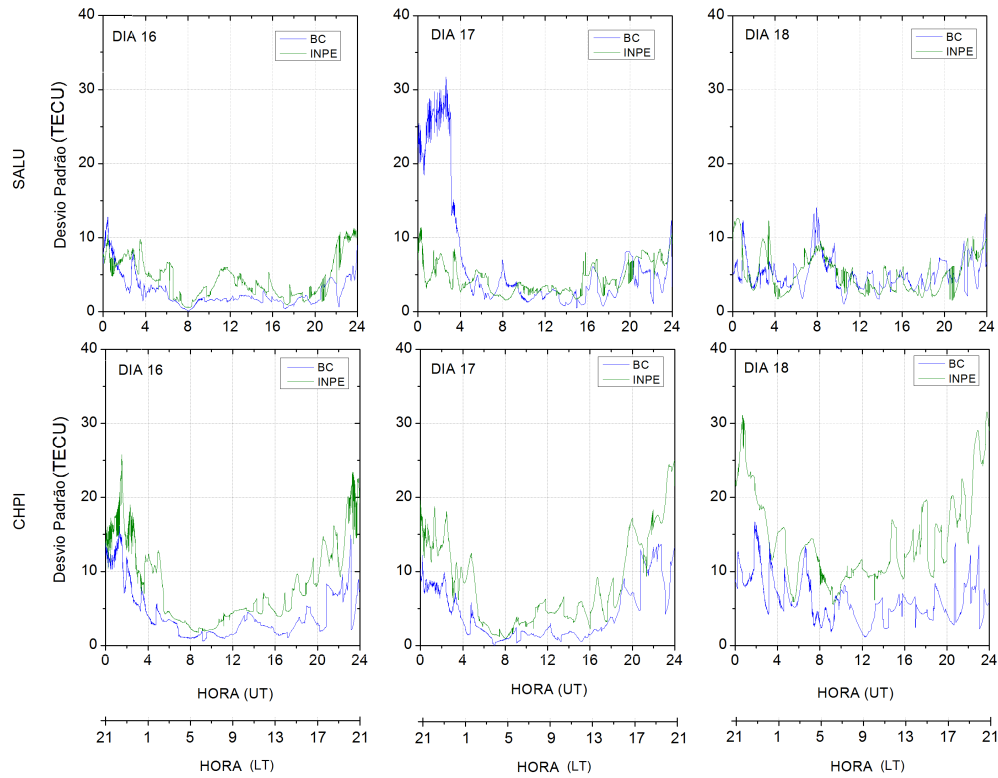
Figura 5.17 - Teste de qualidade para os dias calmos 5, 10 e 14 de março de 2015, representado pelas técnicas INPE (verde) e BC (azul), para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).



### Análise do período perturbado

A Figura 5.18 mostra o teste de qualidade para estação de São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo), para os dias perturbados, dias 16,17 e 18 de março de 2015, em azul está representado o teste de qualidade da técnica BC e em verde o teste de qualidade calculado segundo a técnica do INPE.

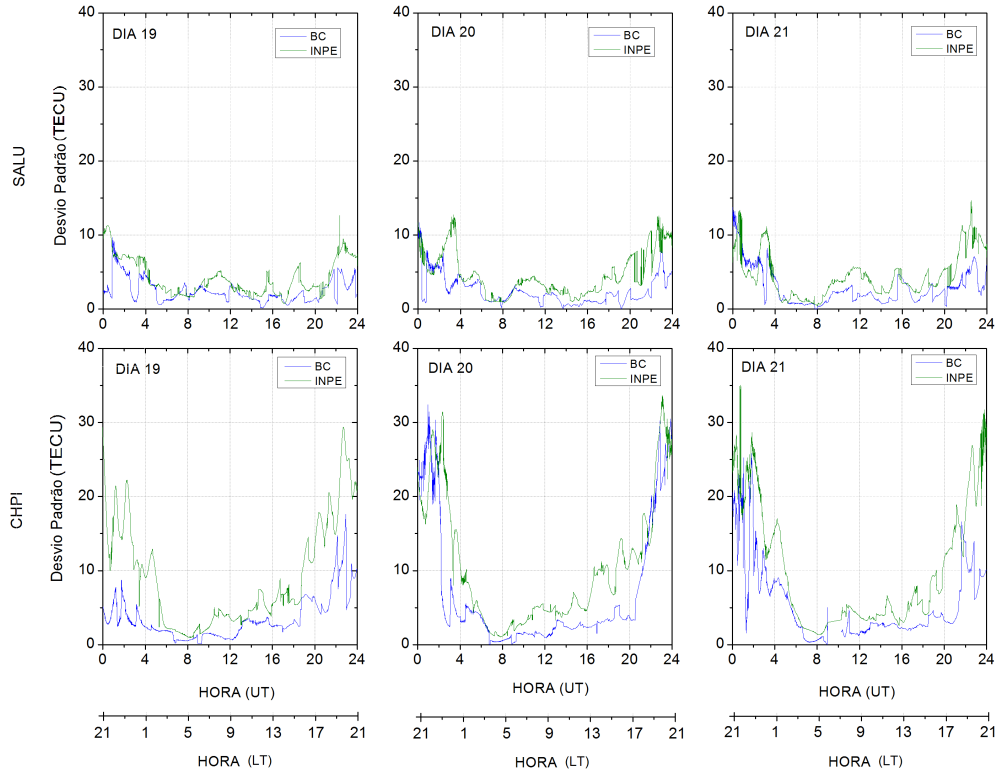
Figura 5.18 - Teste de qualidade para os dias perturbados 16, 17, e 18 de março de 2015, representado pelas técnicas INPE (verde) e BC (azul), para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).



### Análise do período da fase de recuperação

A Figura 5.19 mostra o teste de qualidade para estação de São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo), para os dias da fase de recuperação da tempestade, dias 19, 20 e 21 de março de 2015, em azul está representado o teste de qualidade da técnica BC e em verde o teste de qualidade calculado segundo a técnica do INPE.

Figura 5.19 - Teste de qualidade para os dias da fase de recuperação 19, 20 e 21 de março de 2015, representado pelas técnicas INPE (verde) e BC (azul), para São Luís (acima) e Cachoeira Paulista (abaixo).



## 5.2 Análise da variabilidade sazonal e do ciclo solar

Nessa seção será analisada a variabilidade sazonal e do ciclo solar, considerando Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009), Equinócio de março (março e abril de 2009), Solstício de inverno (maio a agosto de 2009) e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009) para o mínimo solar. Para o máximo solar será analisado, Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015), Equinócio de março (março e abril de 2015), Solstício de inverno (maio a agosto de 2015) e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015).

A seguir serão feitas análises comparativas entre as técnicas utilizadas, INPE, BC e ICTP, também será estudado o comportamento do TEC nas diferentes condições

sazonais, máximo e mínimo solar.

### **5.2.1 Variabilidade sazonal no mínimo solar**

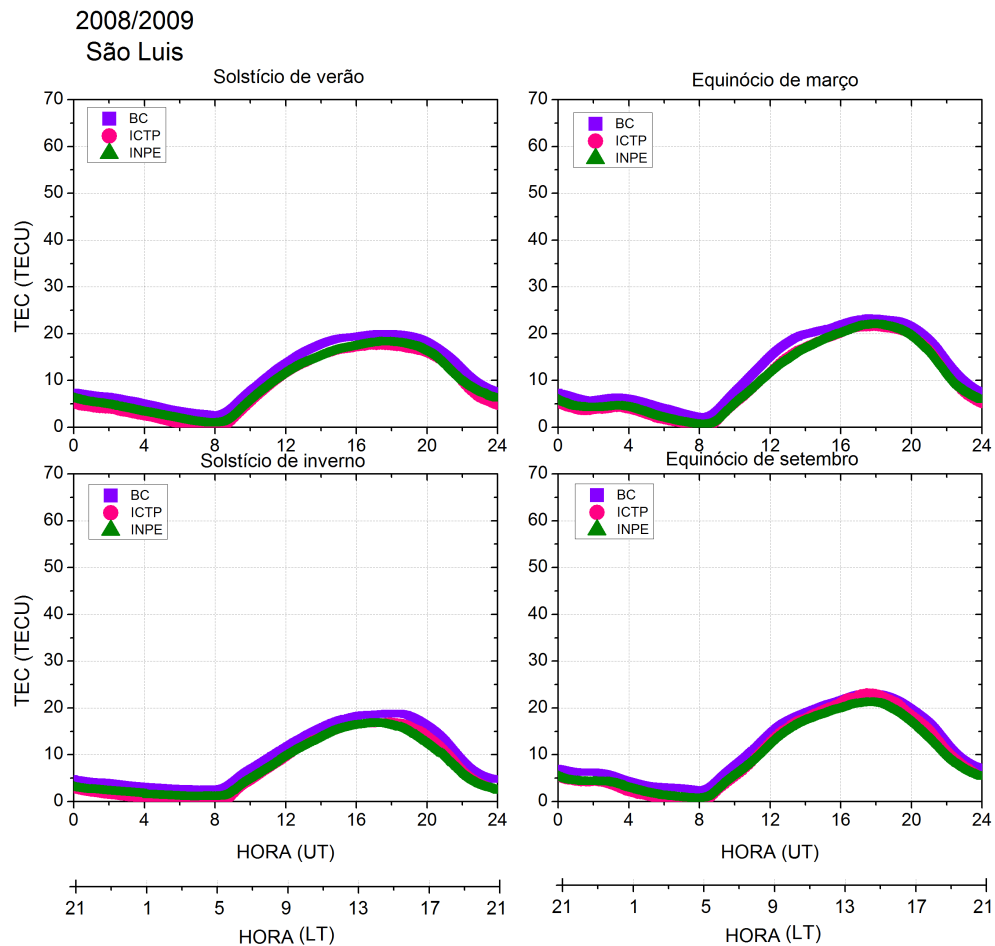
Inicialmente foi feita uma análise sobre a sazonalidade dos resultados do cálculo do TEC obtido pelas três técnicas avaliadas: INPE, ICTP e BC.

As curvas de TEC foram obtidas através do cálculo da média dos resultados de TEC para todos os dias magneticamente calmos considerando o índice  $K_p \leq 3$ , para cada estação do ano.

#### **Resultados para a estação de São Luís**

A **Figura 5.20** mostra as curvas representativas do TEC para um período de 24 horas (UT) separadas entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009), Equinócio de março (março e abril de 2009), Solstício de inverno (maio a agosto de 2009) e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009).

Figura 5.20 - Média horária do VTEC segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.



Em uma primeira análise, percebe-se que todas as curvas de médias de TEC têm um comportamento global esperado, com um aumento dos valores de TEC a partir do nascer do Sol, por volta das 8,5 UT (5,5 LT), atingindo valores máximos próximos às 18 UT (15 LT). Em seguida, conforme a radiação ionizante do Sol sobre a atmosfera vai sendo reduzida com a aproximação do anoitecer, o TEC vai diminuindo através do processo natural de recombinação eletrônica, devido à não incidência que não tem mais a concorrência da ionização solar até o fim da madrugada.

Outra informação que surge da análise da [Figura 5.20](#) é que o maior valor de TEC observado foi 25 TECU nos Equinócios e se apresenta em torno de 20% (5 TECU) menor no Solstício de inverno. Estes valores estão de acordo com os valores típicos do TEC para períodos calmos durante o mínimo de atividade solar na região equatorial brasileira.

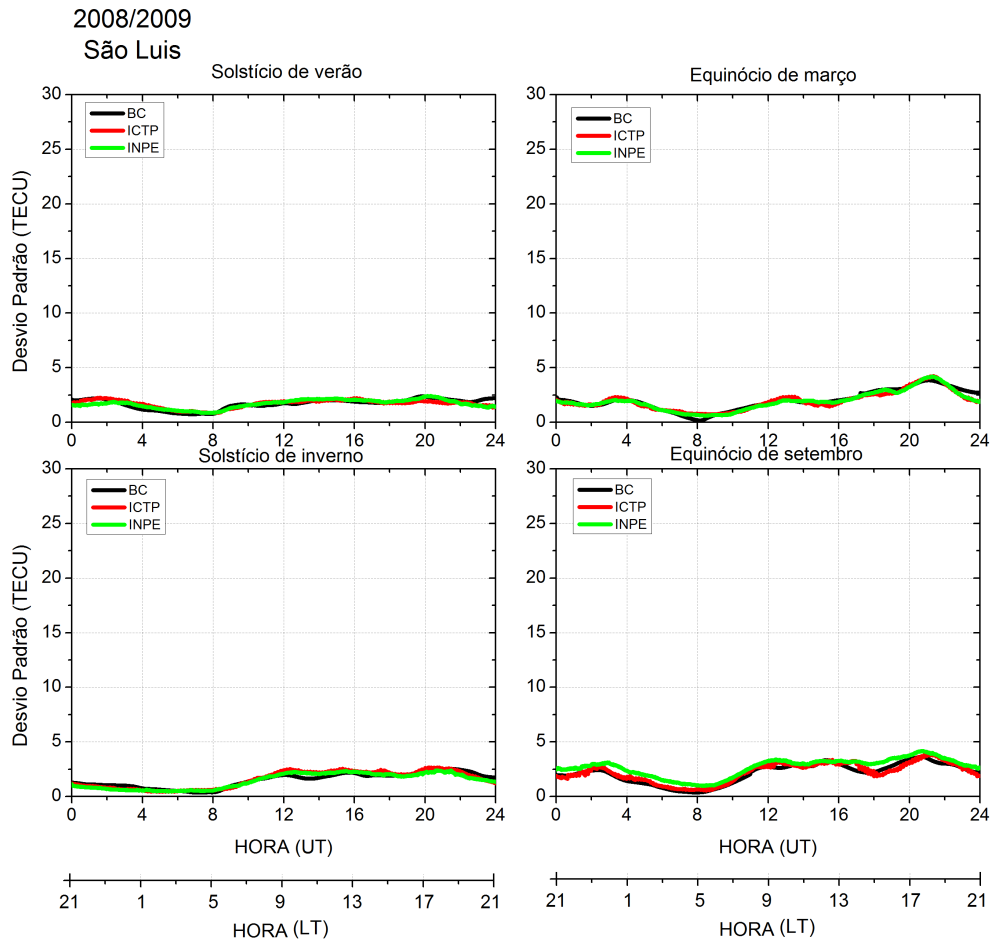
As curvas médias obtidas pelas três técnicas não apresentam grandes diferenças entre si. No entanto, pode-se perceber que os valores de TEC médio obtidos pela técnica ICTP, para a estação de São Luís, atingiram valores negativos durante a madrugada. As diferenças entre os resultados obtidos pelas três técnicas de cálculo de TEC na região equatorial será discutida novamente no item 4.2.2.

Os valores do desvio padrão das curvas de TEC utilizadas, ao se produzir cada curva média da [Figura 5.20](#) são mostrados separadamente na [Figura 5.21](#) para facilitar a visualização.

Foi possível perceber pelos desvios padrão mostrados na [Figura 5.21](#) que os mesmos se mantiveram abaixo de 5 TECU com uma perceptível redução do seu valor durante a madrugada. Isso indica que os valores de TEC obtidos por essas técnicas apresentaram uma variabilidade diária absoluta muito baixa tanto nos períodos diurno como noturno, ao longo de todo ano.



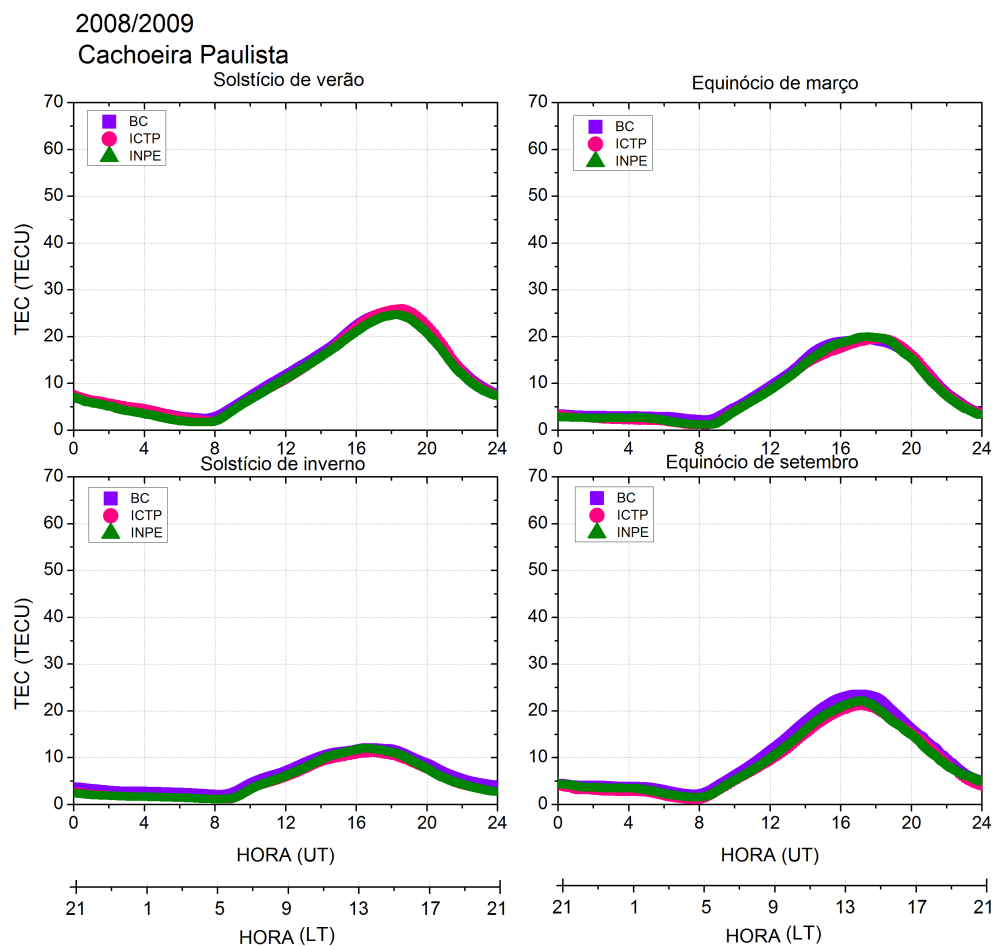
Figura 5.21 - Desvio padrão da média segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.



## Resultados para a estação de Cachoeira Paulista

A mesma metodologia empregada para São Luís foi feita para Cachoeira Paulista, Figura 5.22.

Figura 5.22 - Média horária do VTEC segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.



A Figura 5.22 mostra as curvas representativas do TEC para um período de 24 UT

separadas entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009).

Em uma análise geral, na [Figura 5.22](#) o TEC apresenta um comportamento esperado, dado pelas curvas de TEC. Apresentando valores máximos às 18 UT (15 LT), como discutido anteriormente para a estação de São Luís. Nota-se também que o valor máximo de TEC médio é próximo de 25 TECU.

É importante ressaltar que no Solstício de inverno obteve-se menores valores de TEC para a estação de Cachoeira Paulista ([Figura 5.22](#)), comparado com São Luís ([Figura 5.20](#)).

Essas curvas de TEC obtidas pelas três técnicas não mostraram grandes diferenças entre si. Diferentemente das curvas obtidas para São Luís, Cachoeira Paulista não apresentou valores negativos para nenhuma das técnicas utilizadas.

É perceptível que sobre a região equatorial, São Luís, o TEC apresenta diferentes comportamentos ao longo do ano, comparado à crista da EIA, Cachoeira Paulista. Nesta o TEC é maior nos períodos de Equinócios e Solstício de verão, já em São Luís maiores evidências encontra-se nos Equinócios.

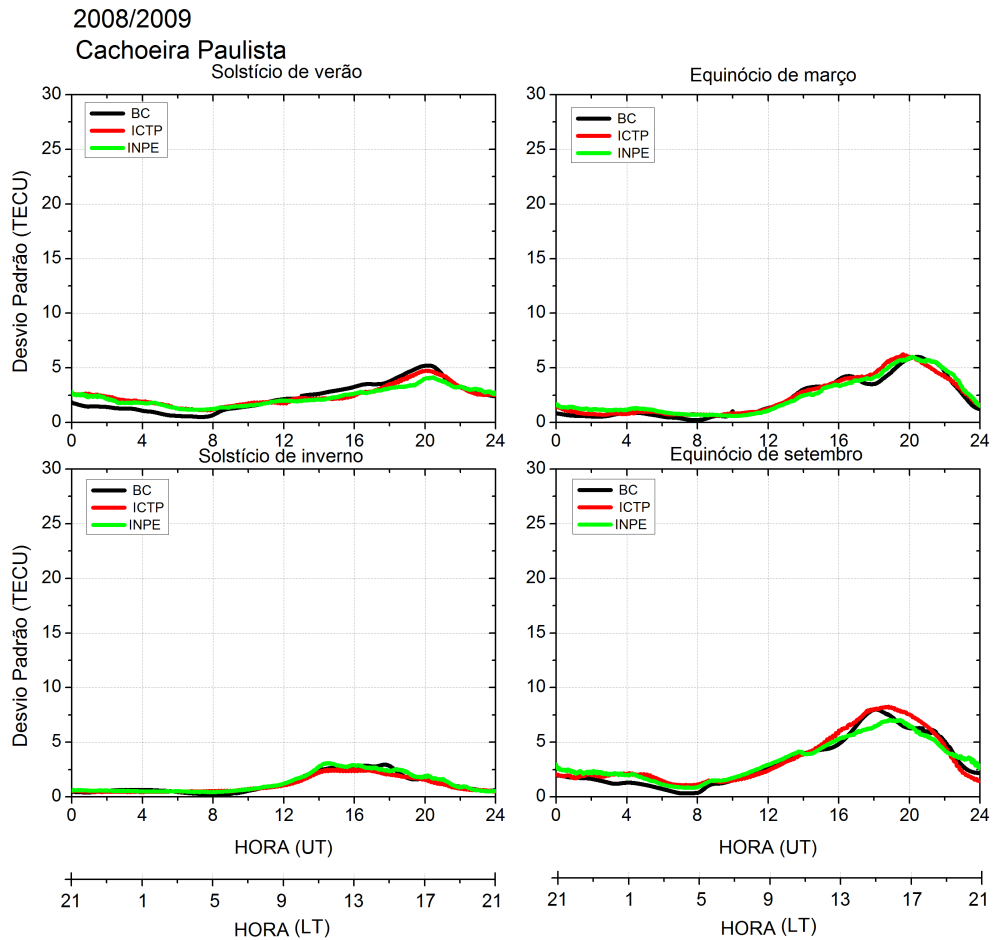
Uma característica marcante é que em São Luís o TEC é maior no Equinócio de março comparado ao de setembro. Isso é devido a uma assimetria equinocial do TEC (ocorre em baixas latitudes) ([LIU et al., 2010](#)). [Jonah \(2013\)](#) mostrou que isso é decorrente da diferença de temperatura dos íons e pela razão oxigênio por nitrogênio.

Comparando as duas estações utilizadas, observou-se que no Solstício de inverno o TEC apresenta valores maiores em São Luís que em Cachoeira Paulista.

O desvio padrão das curvas de TEC referentes a [Figura 5.22](#) são apresentadas separadamente na [Figura 5.23](#) para facilitar a visualização.

Os valores de desvios padrão apresentados na [Figura 5.23](#) se mantiveram abaixo de 5 TECU apenas para os Solstício de inverno, apresentando valores maiores no Equinócio de setembro, chegando a aproximadamente 8 TECU. Em todas as estações do ano foi observada uma perceptível redução do seu valor durante a madrugada.

Figura 5.23 - Desvio padrão da média segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2008, dezembro de 2008, janeiro de 2009 e fevereiro de 2009); Equinócio de março (março e abril de 2009); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2009); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2009), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.



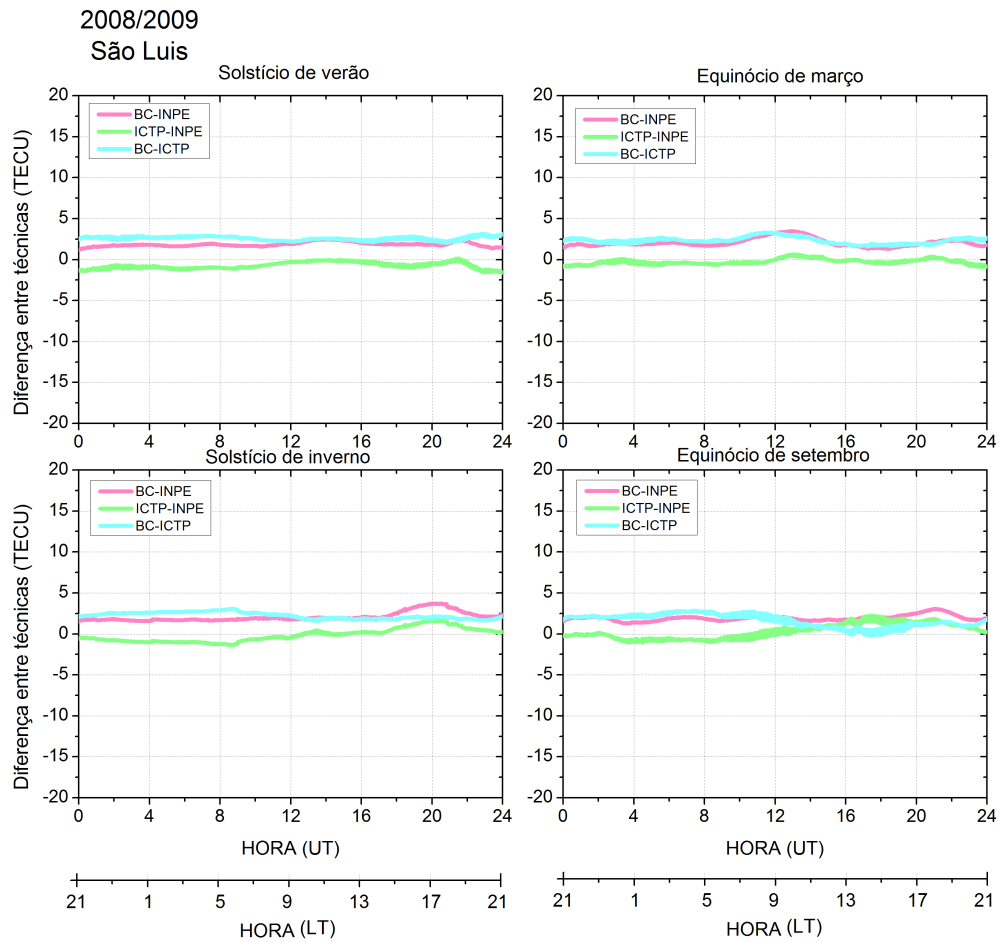
## 5.2.2 Diferenças entre as técnicas no mínimo solar

### Resultados para a estação de São Luís

De forma a destacar as diferenças entre as curvas médias de TEC obtidas pelas três técnicas apresentadas na Figura 5.20 foram realizadas as diferenças entre os pares de curvas obtidas pelas técnicas BC - INPE, ICTP - INPE e BC - ICTP, conforme

mostrado na Figura 5.24.

Figura 5.24 - Diferenças entre as técnicas referente à Figura 5.20 para São Luís, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP. A escala vertical escolhida é a mesma utilizada nas figuras do item 4.2.4 na análise das diferenças entre as técnicas no período de máxima atividade solar.



Pela Figura 5.24 percebe-se que as maiores diferenças foram de até aproximadamente 0,25 TECU, mostrando a grande coerência entre os resultados das três diferentes técnicas para o cálculo do TEC no período de mínimo solar na região equatorial em todas as estações do ano.

Enquanto as curvas BC-INPE (rosa) apresentaram sempre valores positivos, as curvas ICTP-INPE (verde) se mostraram a maior parte das vezes abaixo de ou próximas a zero. São observados valores positivos para a curva ICTP-INPE nas horas do período da tarde e início da noite no Solstício de inverno e a partir das 12 UT (9 LT) no Equinócio de setembro. Isso mostra que a técnica atualmente adotada no INPE apresenta valores de TEC, em média, sempre abaixo dos resultados do BC e, na maior parte dos horários ao longo do ano, acima dos resultados do ICTP.

As curvas BC-ICTP (azul) em geral ficaram acima de zero nos gráficos da [Figura 5.24](#). A curva azul chega a aproximadamente zero durante poucas horas no período vespertino, durante o Equinócio de setembro.

Uma análise quantitativa desses resultados é mostrada na [Tabela 5.13](#). A [Tabela 5.13](#) mostra a diferença entre as técnicas através do cálculo da média das diferenças para cada curva da [Figura 5.24](#). Também são mostrados os valores do desvio padrão relacionado a essa diferença, o RMSD, e o índice de correlação entre cada par considerado.

Tabela 5.13 - Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de São Luís.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Solstício de verão	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	1,86	0,26	1,88	0,999
ICTP-INPE	-0,73	0,39	0,83	0,999
BC-ICTP	2,59	0,22	2,60	0,999
Equinócio de março	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	2,07	0,52	2,13	0,997
ICTP-INPE	-0,26	0,32	0,42	0,999
BC-ICTP	2,33	0,41	2,37	0,998
Solstício de inverno	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	2,09	0,56	2,16	0,996
ICTP-INPE	-0,15	0,82	0,83	0,995
BC-ICTP	2,24	0,39	2,27	0,999
Equinócio de Setembro	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	1,94	0,36	1,97	0,998
ICTP-INPE	0,31	0,90	0,95	0,998
BC-ICTP	1,63	0,76	1,80	0,999

Pela [Tabela 5.13](#) observou-se quantitativamente, pelos valores médios da diferença total em 24 horas, que BC-INPE apresentam valores positivos, ICTP-INPE valores

negativos em todas as estações do ano exceto no Equinócio de setembro e BC-ICTP está sempre positivo. Os valores médios foram baixos e ficaram entre -0,73 TECU até 2,59 TECU. Os maiores valores para o desvio padrão, que indica as variações mais significativas entre os resultados, ocorreram no Solstício de inverno para ICTP-INPE e no Equinócio de setembro para ICTP-INPE e BC-ICTP. Mesmo assim o desvio padrão apresentou valores muito pequenos, sempre inferiores a 0,90 TECU.

Os valores de RMSD são sempre baixos, especialmente para as curvas ICTP-INPE em todas as estações do ano, indicando como os resultados dessas duas técnicas foram muito próximos entre si sob essas condições ao longo de um ano.

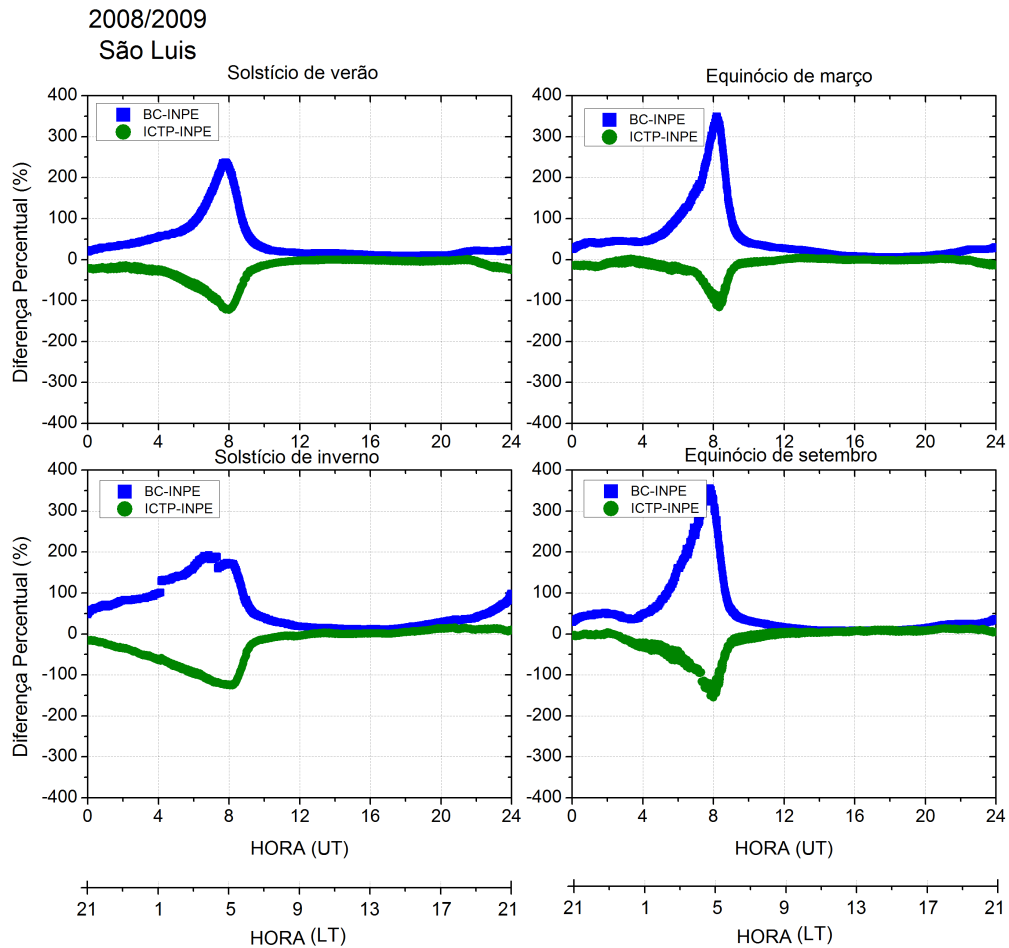
A [Tabela 5.13](#) também evidencia a grande correlação entre as curvas de TEC médio para o mínimo solar na estação de São Luís já que os índices de correlação foram sempre acima de 0,994 nas condições analisadas.

Os dados da [Tabela 5.13](#) mostram que as diferenças entre as curvas médias das diferentes técnicas são muito pequenas em valores absolutos. Porém, os valores de TEC não são muito altos no período de mínimo solar, principalmente durante a madrugada. Adicionalmente, as curvas de TEC também apresentam valores reduzidos durante o Solstício de inverno, conforme pôde ser observado na [Tabela 5.13](#).

Portanto, para verificar a relevância das diferenças observadas nesses períodos de TEC reduzidos, as curvas das diferenças BC-INPE e ICTP-INPE foram refeitas com valores percentuais com respeito aos valores obtidos pela técnica INPE, [Figura 5.25](#).

Nota-se que a curva BC-INPE apresentou diferenças percentualmente maiores que ICTP-INPE em todos os horários. A [Figura 5.25](#) evidencia também que para ambas as curvas as maiores diferenças percentuais ocorrem no período da madrugada entre 4 UT (1 LT) e 9 UT (6 LT), com um pico em torno das 9 UT (6 LT) quando o TEC atinge o seus menores valores. Esse é o período em que mesmo pequenas alterações nos valores médios do TEC obtidos pelas diferentes técnicas acabam se tornando relativamente grandes.

Figura 5.25 - Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para São Luís.



Observa-se que no inverno as diferenças percentuais BC-INPE entre 22 UT (19 LT) e 6 UT (3 LT) são maiores que nas outras estações do ano. Por outro lado, o aumento nos valores percentuais de pico dessas diferenças não foi tão grande entre maio e agosto.

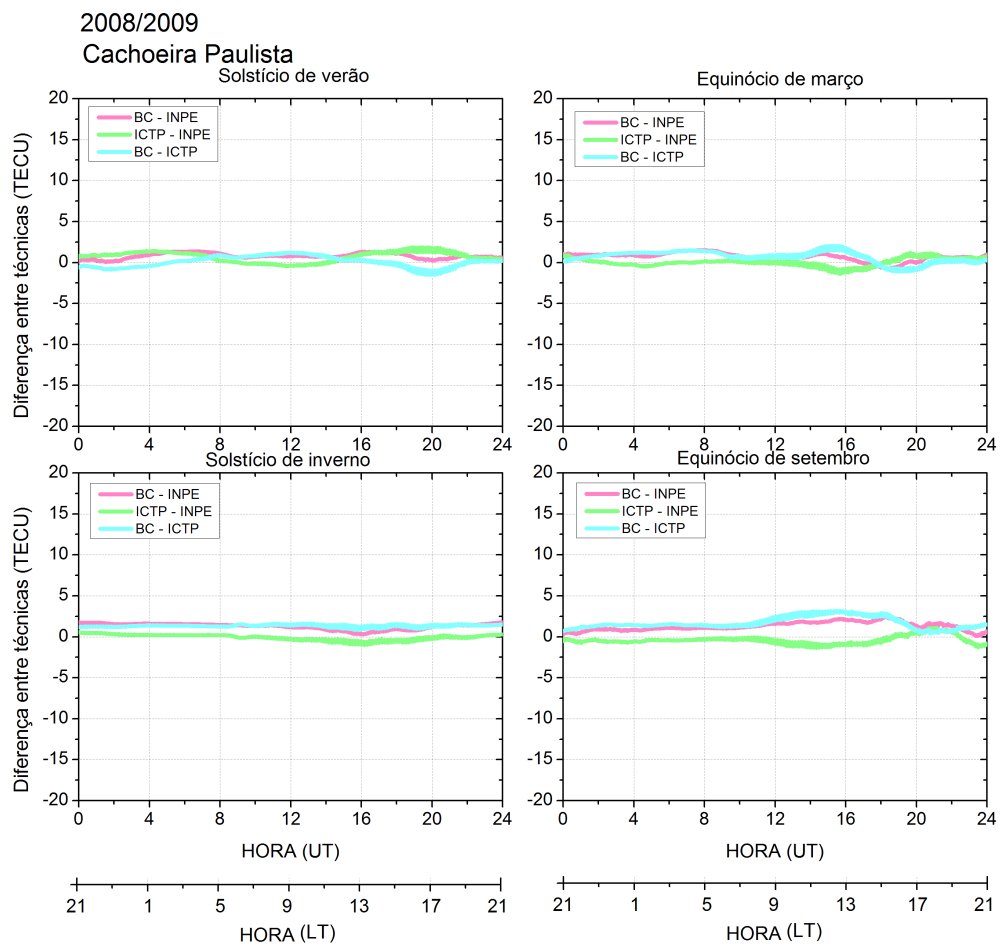
### Resultados para a estação de Cachoeira Paulista

Para destacar as diferenças obtidas entre as curvas médias de TEC pelas três técnicas apresentadas na Figura 5.22 foram feitas as diferenças entre os pares de curvas



dadas pelas técnicas BC - INPE, ICTP - INPE e BC - ICTP, conforme mencionado anteriormente, essa diferença está apresentada na Figura 5.26.

Figura 5.26 - Diferenças entre as técnicas referente à Figura 5.22 para Cachoeira Paulista, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP. A escala vertical escolhida é a mesma utilizada nas figuras do item 4.2.4 na análise das diferenças entre as técnicas no período de máxima atividade solar.



Pela Figura 5.26 percebe-se que as diferenças não ultrapassaram de aproximadamente 0,25 TECU, assim como para a estação de São Luís, mostrando a grande semelhança entre as três técnicas utilizadas no período de mínima atividade solar na região da crista da EIA em todas as estações do ano.

Enquanto as curvas BC-INPE (rosa) apresentaram sempre valores positivos, as curvas ICTP-INPE (verde) se mostraram a maior parte das vezes abaixo de ou próximas a zero. Mostrando que para Cachoeira Paulista assim como para São Luís, que a técnica atualmente adotada no INPE apresenta valores de TEC, em média, sempre abaixo dos resultados do BC e, na maior parte dos horários ao longo do ano, acima dos resultados do ICTP. Na [Figura 5.26](#) é verificada uma diferença ainda menor que para a estação de São Luís, isso é perceptível pois os valores se aproximam ainda mais de zero.

A [Tabela 5.14](#) apresenta os resultados de forma quantitativa. A mesma, mostra a diferença entre as técnicas através do cálculo da média das diferenças para cada curva da [Figura 5.26](#). Também são apresentados os valores do desvio padrão relacionado a essa diferença, o RMSD e o índice de correlação entre cada par considerado.

Tabela 5.14 - Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Solstício de verão	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	0,80	0,33	0,87	0,999
ICTP-INPE	0,72	0,61	0,94	0,997
BC-ICTP	0,086	0,67	0,68	0,996
Equinócio de março	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	0,72	0,50	0,87	0,998
ICTP-INPE	0,03	0,48	0,48	0,997
BC-ICTP	0,69	0,69	0,97	0,994
Solstício de inverno	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	1,27	0,37	1,32	0,999
ICTP-INPE	-0,07	0,349	0,36	0,999
BC-ICTP	1,34	0,13	1,35	0,999
Equinócio setembro	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	1,30	0,52	1,40	0,999
ICTP-INPE	-0,42	0,86	0,95	0,992
BC-ICTP	1,72	0,98	1,98	0,992

Pela [Tabela 5.14](#) pode-se observar quantitativamente pelos valores médios da diferença total em 24 horas que BC-INPE apresentam valores positivos, ICTP-INPE valores negativos no Solstício de inverno e Equinócio de setembro e BC-ICTP está sempre positivo. Os valores médios foram baixos e ficaram entre 0,03 TECU até 1,7 TECU, em módulo.

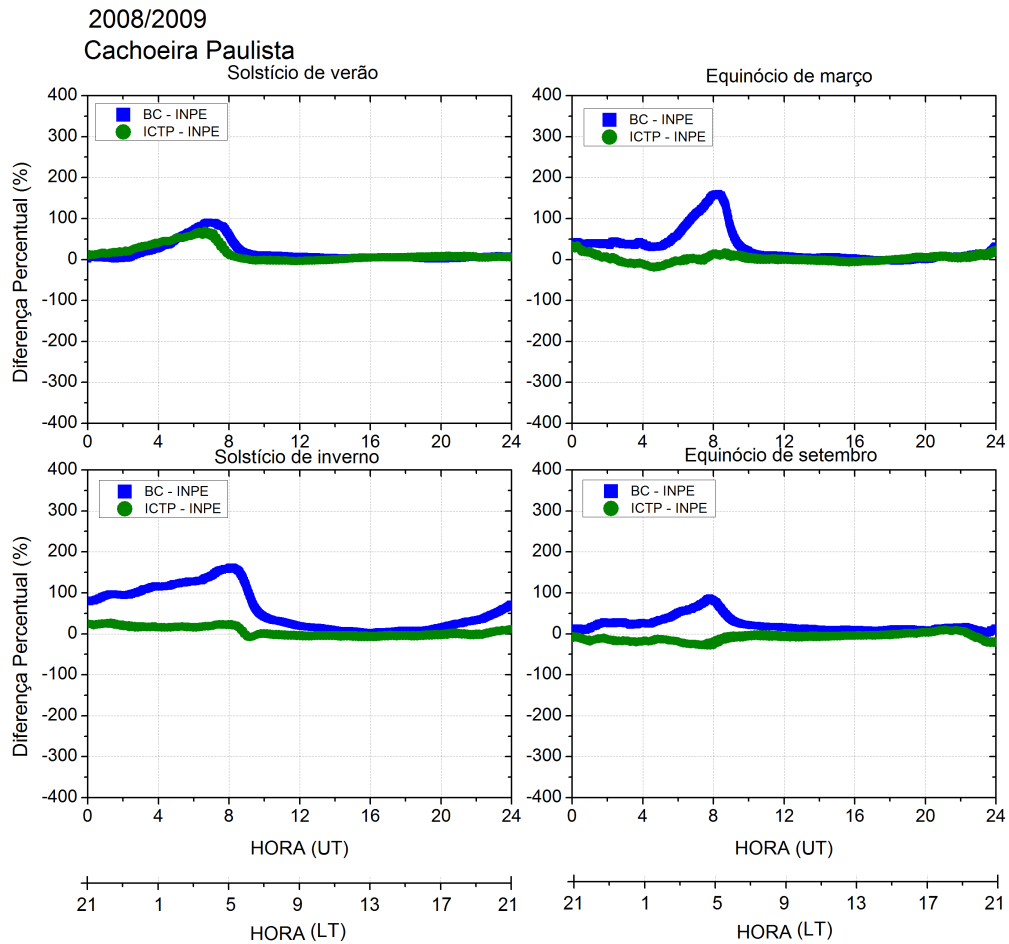
Os maiores valores para o desvio padrão, que indica as variações mais significativas entre os resultados, ocorreram no Equinócio de setembro para BC-ICTP e ICTP-INPE. Mesmo assim o desvio padrão apresentou valores muito pequenos, sempre inferiores a 1,00 TECU.

Os valores de RMSD são sempre baixos, especialmente para as curvas ICTP-INPE em todas as estações do ano, exceto no Solstício de verão, em que o menor valor observado foi entre as técnicas BC e ICTP, indicando como os resultados dentre tais técnicas foram muito próximos entre si sob essas condições ao longo de um ano.

A [Tabela 5.14](#) também evidencia a grande correlação entre as curvas de TEC médio para o mínimo solar na estação de Cachoeira Paulista, já que os índices de correlação foram sempre acima de 0,991 nas condições analisadas, apresentando valores ainda melhores no Solstício de inverno como confirmado pela [Tabela 5.14](#).

Portanto, para analisar a relevância das diferenças observadas nesses períodos de TEC reduzidos para Cachoeira Paulista, as curvas das diferenças BC-INPE e ICTP-INPE foram refeitas com valores percentuais com respeito aos valores obtidos pela técnica INPE, apresentado na [Figura 5.27](#).

Figura 5.27 - Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para Cachoeira Paulista.



Nota-se que a curva BC-INPE apresentou diferenças percentualmente maiores que ICTP-INPE em todos os horários. A Figura 5.27 evidencia também que para ambas as curvas, as maiores diferenças percentuais ocorrem no período da madrugada entre as 4 UT (1 LT) e as 9 UT (6 LT), assim como para a estação de São Luís, com um pico em torno das 9 UT (6 LT) quando o TEC atinge o seus menores valores.

Observa-se que no inverno as diferenças percentuais BC-INPE entre as 22 UT (19 LT) e as 6 UT (3 LT) são maiores que nas outras estações do ano. Quando comparados os valores de pico da diferença percentual da Figura 5.27 com aqueles obtidos

para São Luís (Figura 5.25), percebe-se que em Cachoeira Paulista observou-se valores consideravelmente menores, não atingindo 200%.

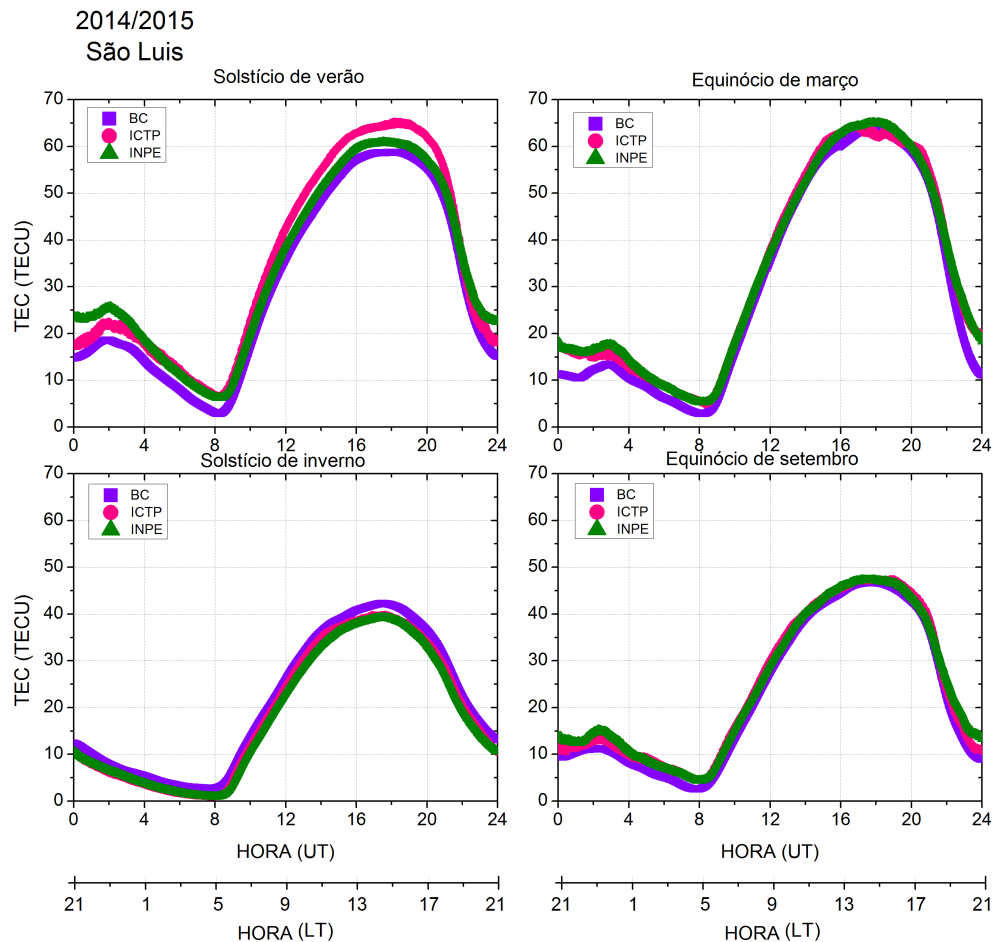
### **5.2.3 Variabilidade sazonal no máximo solar**

#### **Resultados para a estação de São Luís**

Para o máximo solar foi estabelecido o mesmo critério abordado anteriormente, utilizando os anos de 2014 e 2015. Em 2014 o ciclo solar 24 teve seu pico em abril e em 2015 começa seu declínio.

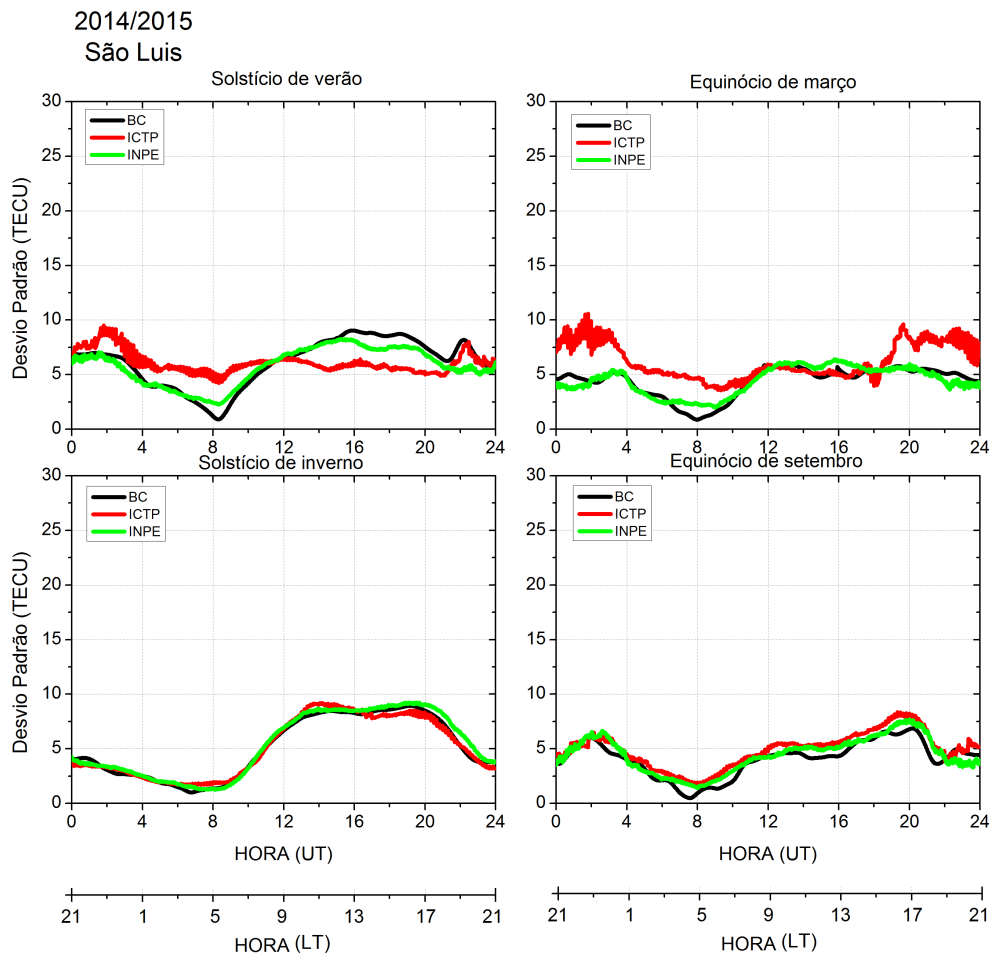
Na Figura 5.28 foi obtida a curva de TEC separado por estações dos ano, com o cálculo das três técnicas, e a Figura 5.29 mostra o desvio padrão de cada uma dessas curvas.

Figura 5.28 - Média horária do VTEC segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.



Na Figura 5.28 observou-se para o Solstício de verão e para o Equinócio de março um valor máximo de aproximadamente 65 TECU, sendo possível notar também que a técnica do ICTP no Solstício de verão apresentou maiores valores de TEC com relação às outras duas técnicas, já para o Solstício de inverno e Equinócio de setembro o maior valor de TEC foi aproximadamente de 45 TECU. As curvas se mostraram semelhantes, porém para o Solstício de verão a técnica ICTP se distanciou das demais.

Figura 5.29 - Desvio padrão da média segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para São Luís dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.



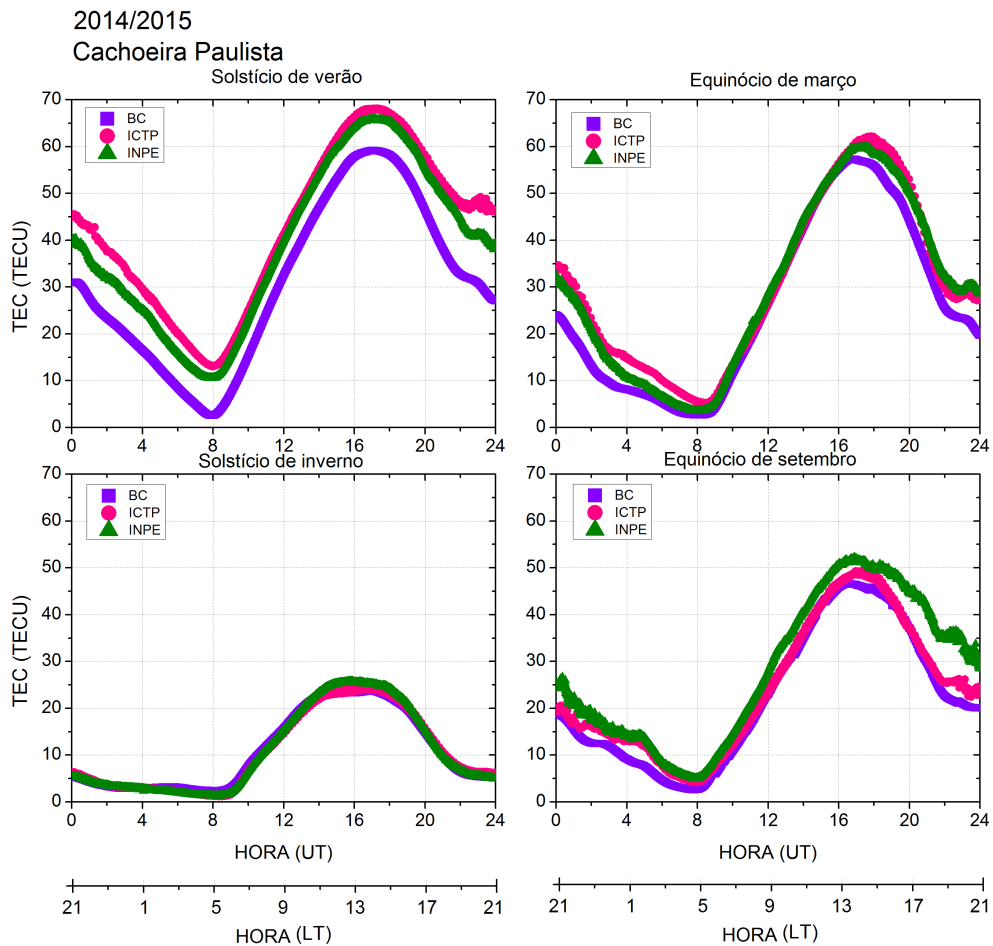
A Figura 5.29 mostrou um desvio padrão variando até aproximadamente 10 TECU. Com relação ao período de mínimo solar, fica evidente que a Figura 5.29 apresenta valores para o desvio padrão, menores que no máximo solar.

### Resultados para a estação de Cachoeira Paulista

Para Cachoeira Paulista, Figura 5.30, observou-se um maior valor de TEC com

relação à estação de São Luís no Solstício de verão, onde a curva da técnica BC (curva roxa) apresenta valores menores que as demais. As curvas se correlacionam melhor no Solstício de inverno, onde foi obtido menores valores de TEC.

Figura 5.30 - Média horária do VTEC segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em roxo representa a técnica BC, em rosa a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.

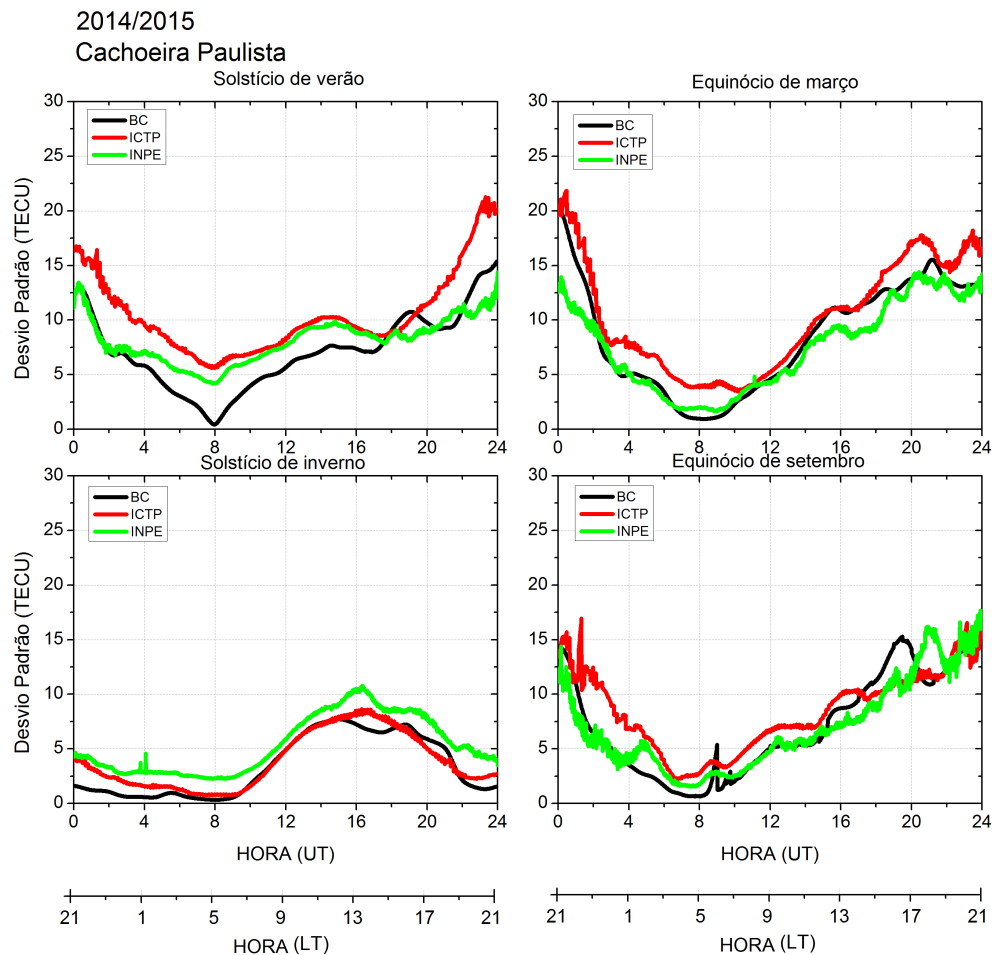


Na Figura 5.31, está representado o desvio padrão referente a Figura 5.30, que



mostra a variação do TEC no decorrer dos dias analisados para cada estação do ano estudada. Os valores mais discrepantes obtidos foram de 20 TECU para a técnica ICTP, na madrugada no Solstício de verão e Equinócio de março.

Figura 5.31 - Desvio padrão da média segundo as técnicas INPE, BC, ICTP para Cachoeira Paulista dividido entre: Solstício de verão (novembro de 2014, dezembro de 2014, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015); Equinócio de março (março e abril de 2015); Solstício de inverno (maio, junho, julho, agosto de 2015); e Equinócio de setembro (setembro e outubro de 2015), onde a curva em preto representa a técnica BC, em vermelho a técnica ICTP e em verde a técnica do INPE.

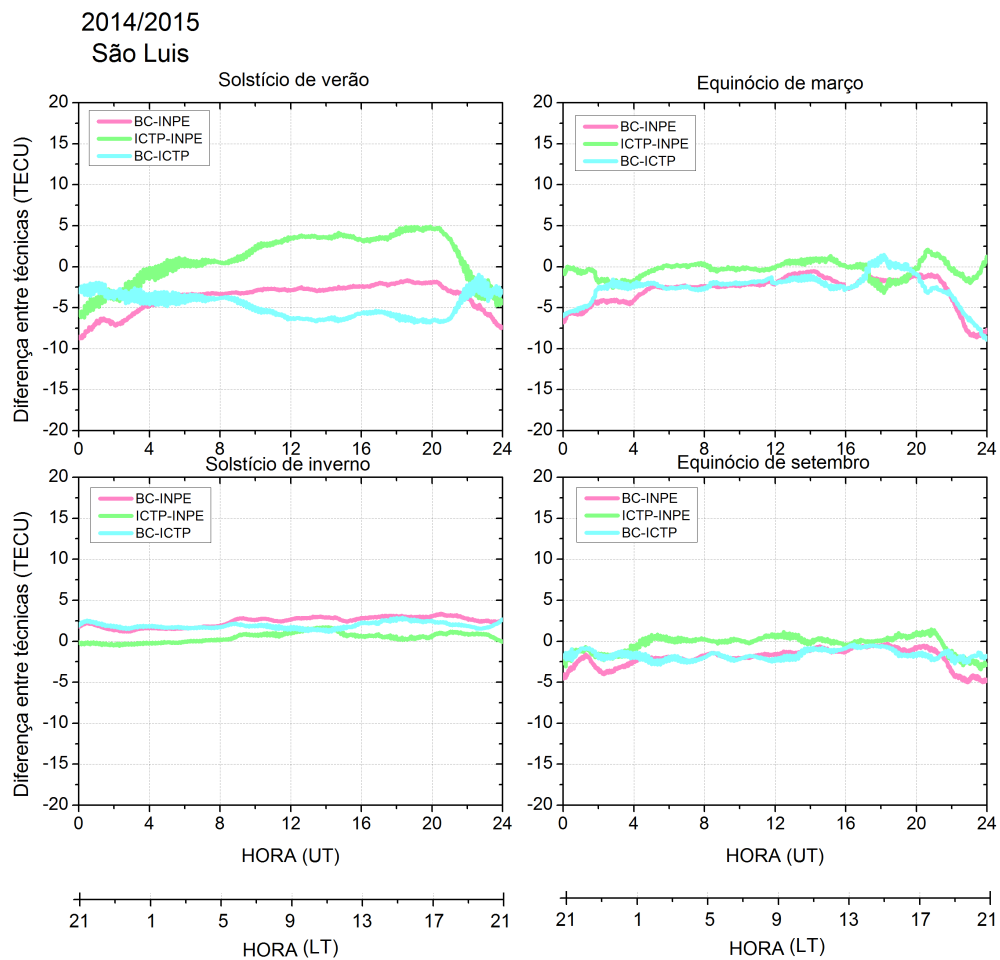


## 5.2.4 Diferenças entre as técnicas no máximo solar

### Resultados para a estação de São Luís

Na Figura 5.32 é representada a diferença entre as técnicas, sendo possível perceber, o que foi dito anteriormente, que as maiores diferenças estão no Solstício de verão entre as técnicas, sendo a maior diferença entre BC e ICTP, apresentando maior valor de aproximadamente 8 TECU, esse mesmo valor também é visto na madrugada do Equinócio de março entre BC e INPE. A menor diferença está no Solstício de inverno, como esperado.

Figura 5.32 - Diferenças entre as técnicas referente à Figura 5.28 para São Luís, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP.



A Tabela 5.15 foi construída para abordar a diferença entre as técnicas e obter os valores respectivos com relação a essa diferença.

Tabela 5.15 - Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de São Luís.

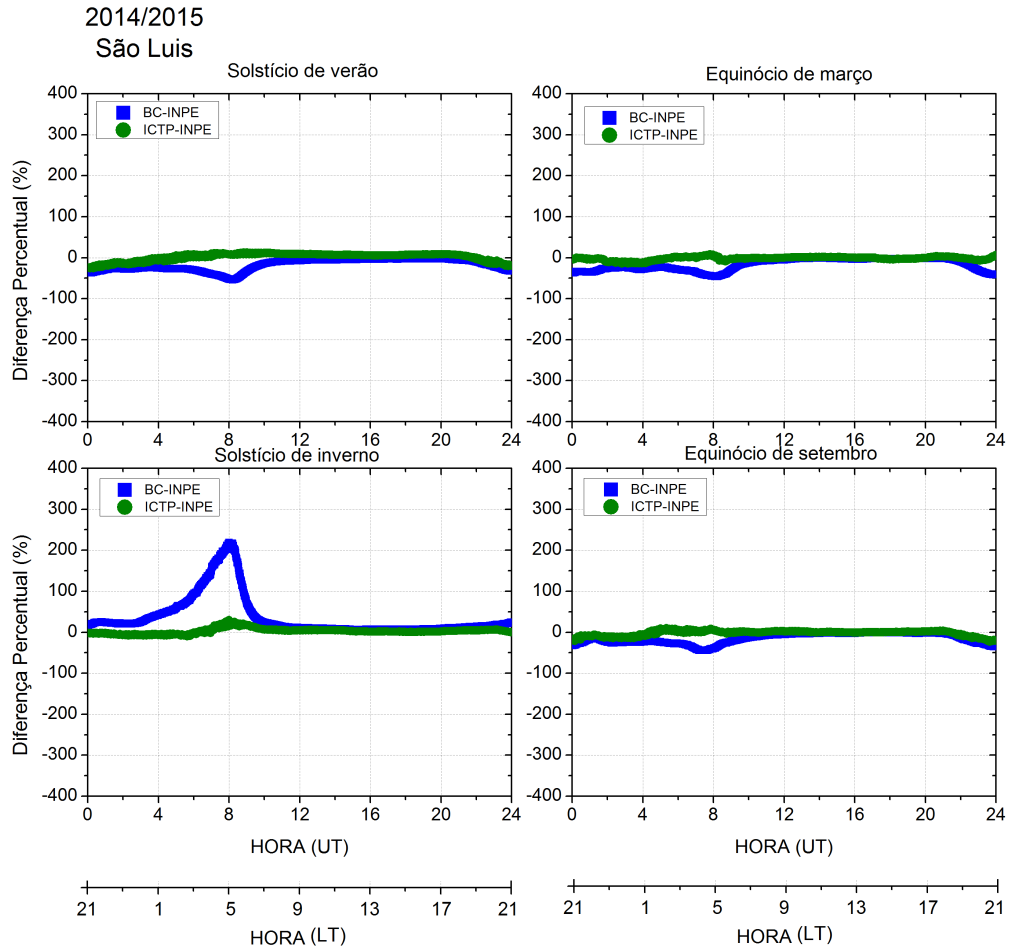
Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Solstício de verão	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-3,69	1,69	4,06	0,997
ICTP-INPE	1,08	2,95	3,14	0,994
BC-ICTP	-4,77	1,43	4,98	0,999
Equinócio de março	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-2,84	1,86	3,39	0,997
ICTP-INPE	-0,37	0,99	1,06	0,998
BC-ICTP	-2,47	1,73	3,017	0,997
Solstício de inverno	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	2,39	0,60	2,47	0,999
ICTP-INPE	0,47	0,57	0,74	0,999
BC-ICTP	1,92	0,36	1,95	0,99973
Equinócio setembro	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-1,98	1,13	2,28	0,998
ICTP-INPE	-0,32	1,016	1,066	0,998
BC-ICTP	-1,66	0,56	1,75	0,999

A Tabela 5.15 evidencia o que ocorre na Figura 5.28, onde a diferença apresenta maiores valores no Solstício de verão, sendo o maior valor 4,77, esse valor é negativo pois a técnica ICTP representa maiores valores que a de BC. O desvio padrão apresentou seu maior valor entre a técnica ICTP e INPE com 2,9. O RMSD apresentou seus maiores valores nas diferenças no Solstício de verão para todas as diferenças. A correlação entre as curvas se mostrou satisfatória, pois elas apresentam a mesma tendência, só diferem em valores.

Para uma melhor visualização das diferenças entre os resultados das técnicas com respeito às curvas de TEC obtidas pela técnica INPE, foi feito um gráfico da diferença percentual entre os valores de TEC obtidos, Figura 5.33.

Analisando a Figura 5.33, a maior variação obtida foi entre BC e INPE no Solstício de inverno, sendo que este foi o período que apresentou menores valores de TEC e que a variação entre as técnicas se mostrou bem pequenas, variando até 2,5 TECU.

Figura 5.33 - Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para São Luís.



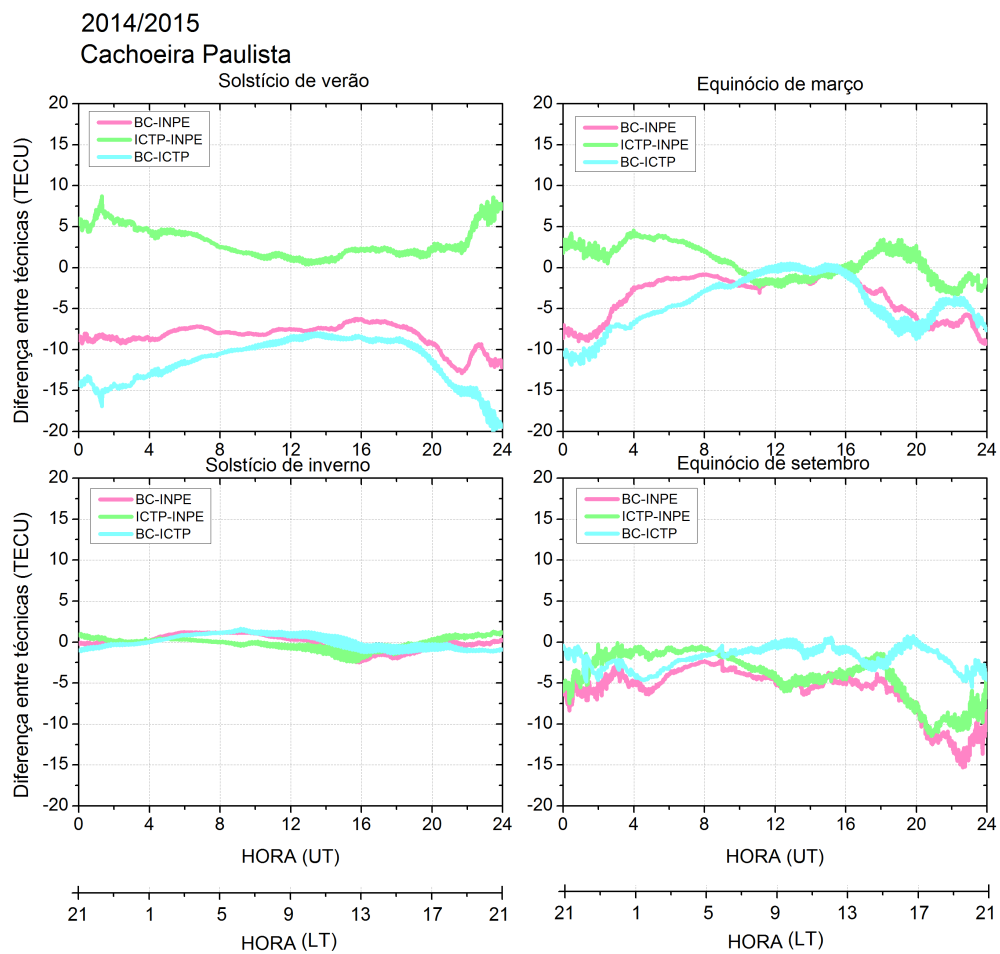
### Resultados para a estação de Cachoeira Paulista

Na Figura 5.34 são mostradas as diferenças em TECU das técnicas, onde observam-se as maiores diferenças no Solstício de verão e a menor no Solstício de inverno como já era de se esperar segundo os resultados anteriores. Entre a técnica BC e ICTP, a maior variação chegou a aproximadamente 20 TECU na madrugada, em aproximadamente 24 UT (21 LT).

No Solstício de verão, a técnica que apresentou diferenças menores foi entre ICTP

e INPE, o que fica evidente com o gráfico da [Figura 5.30](#), onde a curva que mais se afasta das demais é a BC. No Equinócio de setembro a curva que representou a maior diferença foi entre BC e INPE, chegando a aproximadamente 15 TECU.

Figura 5.34 - Diferenças entre as técnicas referente à [Figura 5.30](#) para Cachoeira Paulista, onde a curva em rosa representa a diferença entre as técnicas BC-INPE, em verde ICTP-INPE e em azul BC-ICTP.



Na [Tabela 5.16](#) o mesmo foi feito para a estação de Cachoeira Paulista, a fim de se analisar mais precisamente os resultados, foram obtidos os seguintes valores, como se segue:

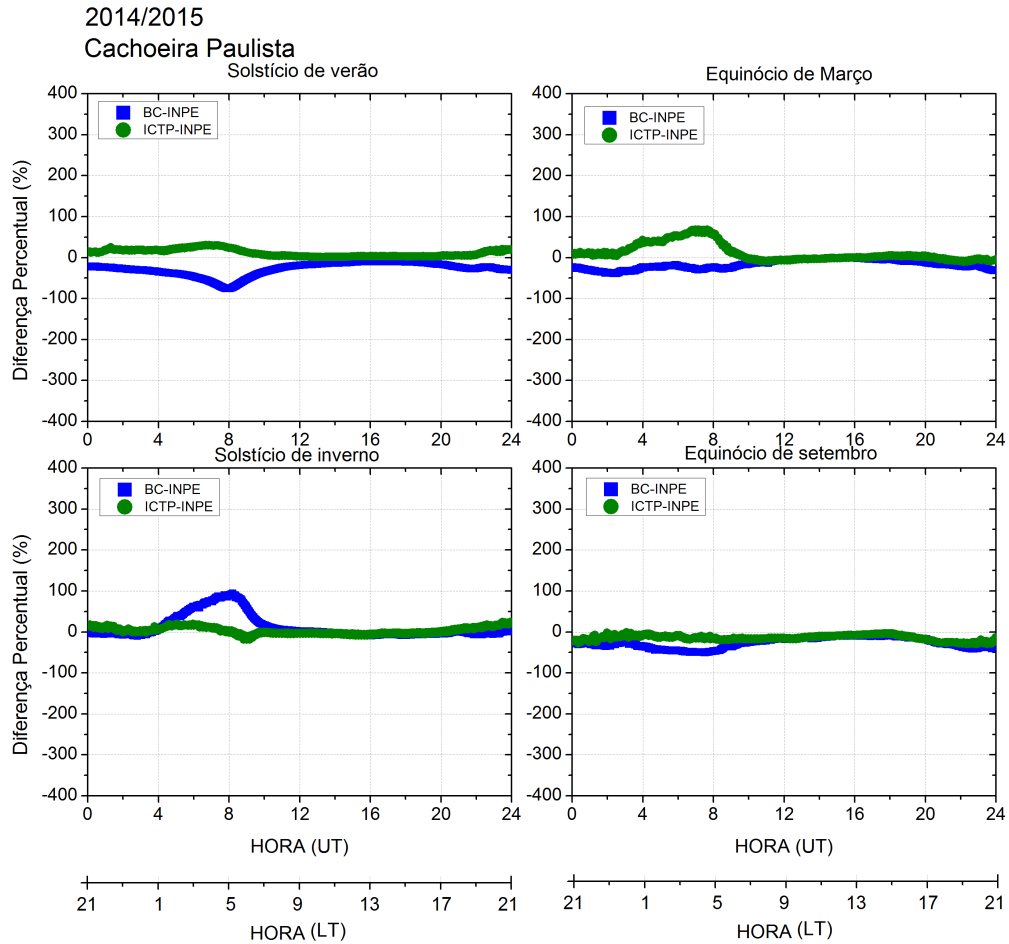
Tabela 5.16 - Valores obtidos pela diferença entre técnicas para a estação de Cachoeira Paulista.

Unidades	TECU	TECU	TECU	-
Solstício de verão	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-8,33	1,45	8,46	0,996
ICTP-INPE	3,14	1,89	3,66	0,994
BC-ICTP	-11,47	2,81	11,81	0,987
Equinócio de março	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-3,62	2,63	4,48	0,989
ICTP-INPE	0,74	2,06	2,19	0,994
BC-ICTP	-4,36	3,22	5,42	0,984
Solstício de inverno	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-0,12	0,99	1,00	0,997
ICTP-INPE	-0,15	0,72	0,74	0,998
BC-ICTP	0,034	0,84	0,84	0,995
Equinócio setembro	Média	Desvio Padrão	RMSD	Correlação
BC-INPE	-5,95	2,90	6,61	0,983
ICTP-INPE	-4,02	2,88	4,95	0,985
BC-ICTP	-1,92	1,32	2,33	0,996

Na [Tabela 5.16](#) pode-se perceber que na média da diferença entre as técnicas foi obtido o maior entre BC-ICTP com 11,47 TECU no Solstício de verão, sendo alto também o valor entre BC e INPE com 8,33 TECU. O desvio padrão se mostrou baixo, significando que houve pouca variação entre as diferenças de técnicas no decorrer do dia, sendo a maior delas 3,21 TECU no Solstício de verão entre BC e ICTP. O RMSD teve maior valor no Solstício de verão, como esperado, tendo maiores valores entre as técnicas BC e ICTP e entre BC e INPE com valores de 11,81 TECU e 8,46 TECU respectivamente, e mostrando menores valores no Solstício de inverno. O índice de correlação que representa a semelhança na tendência das curvas permaneceu próximo de 1, ou seja, teve uma excelente correlação.

Para uma melhor visualização com relação a técnica do INPE, foi feito um gráfico da diferença percentual, deixando a técnica do INPE como padrão para os cálculos, [Figura 5.35](#), o que foi evidente é que as variações ocorreram com maior significado em aproximadamente 8 UT (5 LT), e que variou a quase 100% entre BC e INPE, o que é fácil de ocorrer já que para esse período (Solstício de inverno), observou-se valores muito pequenos no TEC.

Figura 5.35 - Diferença percentual das técnicas com respeito a técnica do INPE, onde a curva azul representa a técnica BC e em verde a técnica INPE, para Cachoeira Paulista.



### 5.2.5 Análise do comportamento do TEC no mínimo e máximo solar

A análise do comportamento do TEC para a mínima e máxima atividade solar será tratado nessa seção a fim de analisar os fatores físicos que influenciam na variabilidade ionosférica, e que por sua vez alteram o TEC.

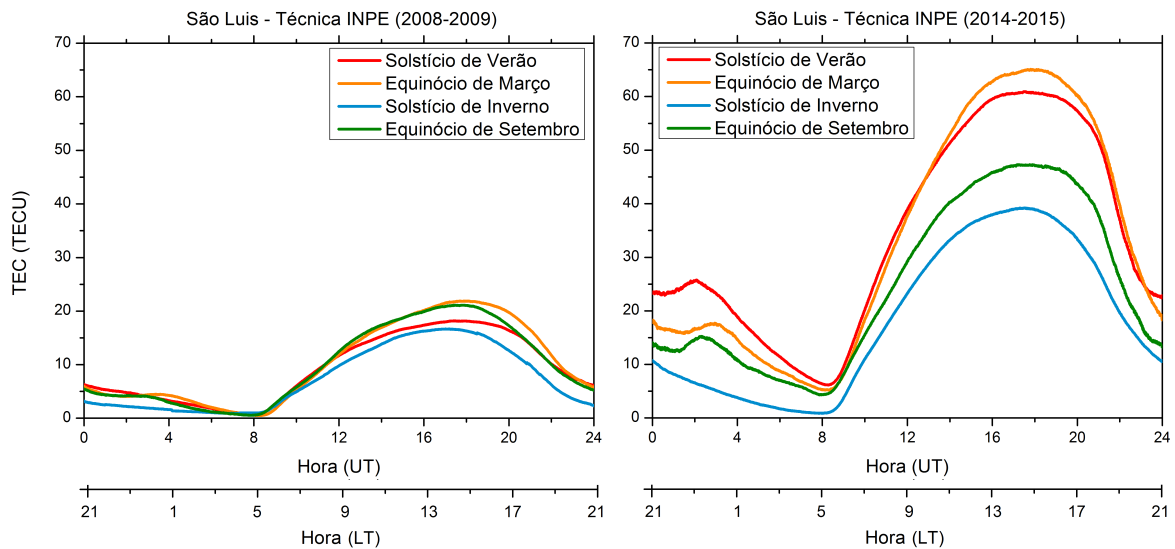
Para observar-se os fatores físicos foi utilizada somente a técnica do INPE, já que devido às análises anteriores essa técnica responde bem aos efeitos ionosféricos, e em comparação com as outras técnicas utilizadas, ela apresenta comportamento similar,

representando bem o TEC nas regiões estudadas.

### Resultados para a estação de São Luís

Na Figura 5.36 estão representados os valores de TEC para as quatro estações do ano, no mínimo (novembro de 2008 a outubro de 2009) e no máximo solar (novembro de 2014 a outubro de 2015), para São Luís.

Figura 5.36 - Comparação das estações do ano para São Luís no ano de mínima e máxima atividade solar. Solstício de verão (curva vermelha), Equinócio de março (curva amarela), Solstício de inverno (curva azul) e Equinócio de setembro (curva verde).



Os picos de TEC que ocorrem aproximadamente às 17 UT (14 LT) são decorrentes da fotoionização, que é resultado do efeito fotoionizante da radiação EUV proveniente do Sol sobre a atmosfera.

No período noturno, quando o fim da incidência de radiação solar cessa a produção de cargas livres, ocorrem os menores valores de TEC devido à prevalência do processo de recombinação eletrônica.

Na Figura 5.36 destaca-se que os Equinócios possuem maiores valores de TEC com-



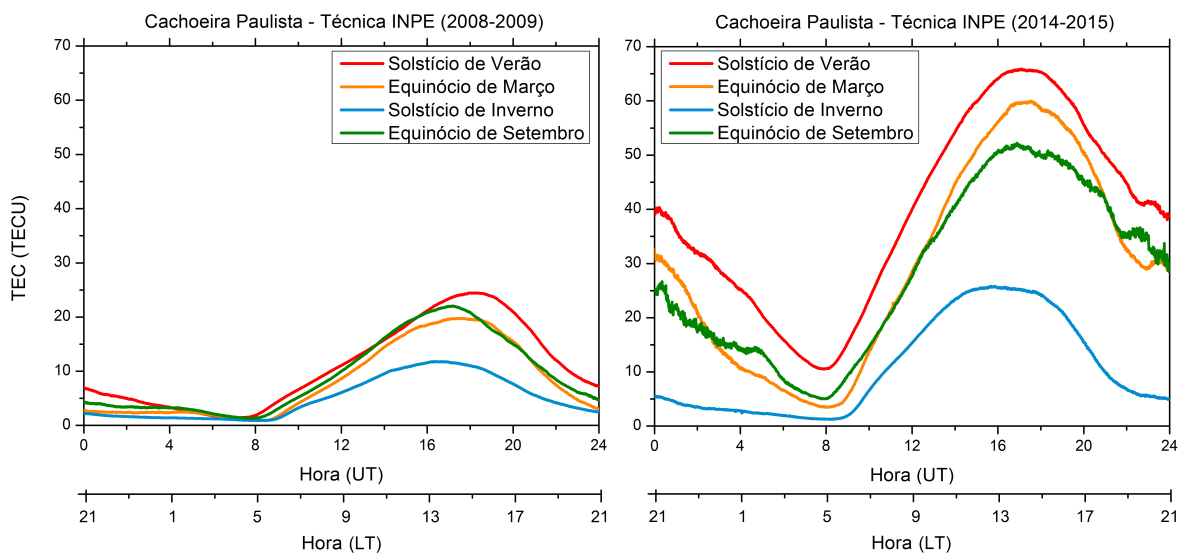
parados aos solstícios, com a exceção do Solstício de verão na fase de máxima atividade solar, que fica comparável ao TEC do Equinócio de março. Isso é devido a um fator chamado variação semianual, já estudado por diversos autores, onde destacam-se: Segundo Ross (1966) essa variação pode estar relacionada à variação do eletrojato equatorial, Olatunji (1967) que constatou que esta variação semianual pode ser proveniente da variação do ângulo zenital (ao meio dia solar), podendo intensificar a produção da ionização e Jilani e YousufZai (2011) que explicam que isso pode ser decorrente também da circulação atmosférica que pode contribuir para maiores picos nos Equinócios.

Jonah (2013) observou que a dissociação de  $N_2$  é o principal processo que remove os elétrons, que por sua vez aumenta a razão  $\frac{O}{N_2}$  resultando na maior densidade eletrônica durante os Equinócios.

### Resultados para a estação de Cachoeira Paulista

Na Figura 5.37 estão representadas as quatro estações do ano, para Cachoeira Paulista, no ano de mínima e máxima atividade solar.

Figura 5.37 - Comparação das estações do ano para Cachoeira Paulista no ano de mínima e máxima atividade solar. Solstício de verão (curva vermelha), Equinócio de março (curva amarela), Solstício de inverno (curva azul) e Equinócio de setembro (curva verde).



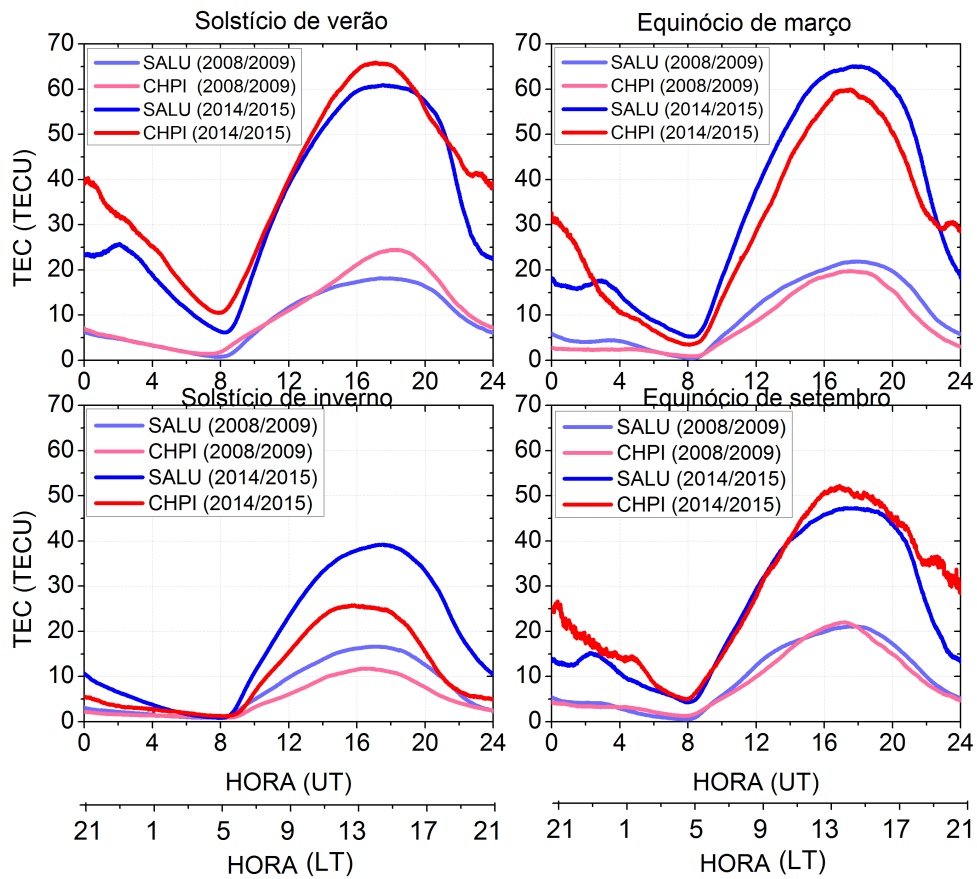
Na [Figura 5.37](#) percebe-se o aumento do TEC no Solstício de verão comparado a outras estações, isso é devido a assimetria anual que sugere que o Solstício de verão possui maior densidade eletrônica que o Solstício de inverno, ficando mais evidente nessa [Figura 5.37](#), à direita, período de máxima atividade solar. Pela [Figura 5.37](#) pode-se perceber que o ano de mínima atividade solar apresenta maiores valores de TEC no Solstício de verão.

Uma análise mais detalhada referente ao que foi apresentado anteriormente está representada na [Figura 5.38](#), onde é mostrado um comparativo entre São Luís e Cachoeira Paulista, com um contraste entre o período de máximo e mínimo atividade solar.

O que fica evidenciado na [Figura 5.38](#) é que o máximo solar se apresenta 100% maior que o período de mínima atividade solar no período de inverno, sendo os outros casos podendo chegar a ser 200% maior que o período de mínimo. Isso se explica devido ao aumento do fluxo solar que é representado pelo F10.7, que mede o fluxo de radiação emitido pelo Sol em ondas de rádio.

Na [Figura 5.38](#) observou-se maiores valores de TEC no Solstício de verão para Cachoeira Paulista em comparação com São Luís. Isso se deve ao fato da fotoionização por radiação de EUV ter influência na formação da EIA, aumentando a densidade eletrônica na crista da anomalia.

Figura 5.38 - Comparação das estações do ano para Cachoeira Paulista e São Luís entre os anos de mínima e máxima atividade solar, representado por São Luís no mínimo solar (lilas), Cachoeira Paulista ano de mínima atividade solar (rosa), São Luís ano de máxima atividade solar (azul), Cachoeira Paulista ano de máximo solar (vermelho).





## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como finalidade a comparação de três técnicas utilizadas para calcular o TEC, a fim de avaliar se os resultados obtidos são adequados para descrever o TEC na região brasileira, em diferentes condições.

Primeiramente, esse estudo permitiu a observação das características do TEC na região equatorial e de baixas latitudes no Brasil, que se comporta de diferentes formas devido à influência da latitude, da sazonalidade, do ciclo solar e de perturbações geomagnéticas.

As três técnicas (BC, INPE e ICTP) apresentaram resultados satisfatórios para estimativa do TEC na região ionosférica brasileira, sendo que a técnica do INPE apresentou maiores similaridades com a técnica do ICTP, apresentando valores de diferença próximos a zero.

De uma maneira geral o comportamento das curvas de TEC obtido pelas três técnicas mostrou uma grande adequação dos resultados nas condições analisadas e, particularmente, o novo método INPE apresentou corretamente as variações do TEC sob as condições da ionosfera brasileira. A análise sazonal mostra que a técnica INPE acompanha os resultados obtidos pelos outros métodos, com valores intermediários (entre as duas outras técnicas) na região equatorial e na crista da EIA principalmente no verão.

A análise realizada durante condições perturbadas utilizou-se também da comparação com o modelo NeQuick2. Ele foi utilizado como referência principalmente para representar um comportamento previsto para a ionosfera se não houvesse a perturbação. Os resultados mostraram, que mesmo nos períodos calmos, o modelo não representa adequadamente os altos valores de TEC atingidos durante o dia na ionosfera brasileira, principalmente na região da crista da EIA, apresentando uma diferença entre as técnicas e o modelo de aproximadamente 25 TECU. Também observou-se que as diferenças do TEC estimados pelas três diferentes técnicas não são significativas durante os dias calmos utilizados como referência para a tempestade geomagnética, com aproximadamente 5 TECU de diferença entre as técnicas em média. O modelo não mostrou bons resultados para o período perturbado pois o mesmo não tem parâmetro de entrada que o permitem acompanhar as variações do TEC ocasionados por eventos transientes.

Na maioria das situações, sempre que uma das técnicas apresentava um compor-

tamento não usual, como valores extremos para o TEC, como valores negativos obtidos pela técnica ICTP no mínimo solar na região equatorial, os resultados da técnica INPE eram corroborados pela técnica BC ou pela técnica ICTP, indicando a sua grande adequação em descrever o comportamento do TEC nas condições da ionosfera nas regiões equatorial e da EIA.

A proposta de se utilizar uma combinação dos valores do TEC obtidos pelas três técnicas para a região brasileira resultou em curvas de TEC com desvio padrão baixo e, portanto, muito próximos do resultado obtido pela técnica do INPE. Os efeitos dos períodos perturbados podem amplificar essas pequenas diferenças em torno da fase principal de uma tempestade geomagnética, como no final do dia 17 para a estação de Cachoeira Paulista e no decorrer do dia 18 para as duas estações estudadas, atingindo valores de diferença entre as técnicas de até aproximadamente 20 TECU.

Com base na pesquisa realizada considera-se que a técnica do INPE possa ser utilizada em estudos e avaliações do TEC da ionosfera brasileira por:

- a) Apresentar poucos valores de TEC negativo durante a madrugada e, em geral, com valores absolutos pequenos;
- b) Apresentar poucas oscilações bruscas nos valores de TEC;
- c) Apresentar menores valores de desvio padrão na análise independente;
- d) Não possuir grandes diferenças com relação à média das três técnicas estudadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 35, n. 5, p. 771–787, 2005. 15
- ABDU, M.; SOUZA, J. D.; SOBRAL, J.; BATISTA, I. Magnetic storm associated disturbance dynamo effects in the low and equatorial latitude ionosphere. **Recurrent magnetic storms: corotating solar wind Streams**, Wiley Online Library, p. 283–304, 2006. 18, 19
- BALAN, N.; BAILEY, G.; ABDU, M.; OYAMA, K.; RICHARDS, P.; MACDOUGALL, J.; BATISTA, I. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the f<sub>3</sub> layer. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 102, n. A2, p. 2047–2056, 1997. 8
- BATISTA, I.; ABDU, M.; SILVA, A. da; SOUZA, J. Ionospheric f<sub>3</sub> layer: Implications for the iri model. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 31, n. 3, p. 607–611, 2003. 8
- BATISTA, I. S. **Dínamo da região F equatorial: assimetrias sazonais e longitudinais no setor americano**. 169 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Sao Jose dos Campos, 1985-04-18 1985. Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.26.21.28.37>>. Acesso em: 20 mar. 2017. 11
- CANDER, L. R. Towards forecasting and mapping ionospheric space weather under cost actions. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 31, n. 4, p. 957–964, 2003. 39
- CIRAOLO, L.; AZPILICUETA, F.; BRUNINI, C.; MEZA, A.; RADICELLA, S. Calibration errors on experimental slant total electron content (tec) determined with gps. **Journal of Geodesy**, Springer, v. 81, n. 2, p. 111–120, 2007. 34, 38
- DAVIES, K. **Ionospheric Radio Propagation**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1965. 26
- DENARDINI, C. M. **Estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial durante o período de máxima atividade solar (1999-2002)**. 271 p. Tese

(Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003-10-22 2004. Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.09.11.16>>. Acesso em:  
20 mar. 2017. 15

FARLEY, D.; BONELLI, E.; FEJER, B. G.; LARSEN, M. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 91, n. A12, p. 13723–13728, 1986. 12

GIOVANNI, G. D.; RADICELLA, S. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 10, n. 11, p. 27–30, 1990. 38

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 1, 7

HEELIS, R.; KENDALL, P.; MOFFETT, R.; WINDLE, D.; RISHBETH, H. Electrical coupling of the e-and f-regions and its effect on f-region drifts and winds. **Planetary and Space Science**, Elsevier, v. 22, n. 5, p. 743–756, 1974. 11

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. Introduction. In: **Global Positioning System**. [S.l.]: Springer, 1994. p. 1–11. 23, 24, 26, 33

\_\_\_\_\_. Global positioning system theory and applications. **Springer-Verlag, Wien, New York**, 1997. 27

JILANI, A. A.; YOUSUFZAI, M. Quantifying the seasonal variation in virtual height of ionosphere f2 layer at pakistan atmospheric region. **Journal of Information & Communication Technology**, v. 5, n. 2, p. 52–60, 2011. 109

JONAH, O. F. **Analysis of Total Electron Content (TEC) variations obtained from GPS data over South America**. 145 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013-02-27 2013. Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.13.21.09>>. Acesso em: 05 abr. 2018. 87, 109



JONES, W. B.; GALLET, R. M. Representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods. **Telecomm. J.**, v. 29, n. 5, p. 129–147, 1962. 40

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere**: Plasma physics and eletrodynamics. [S.l.]: Elsevier, 2009. 1, 2, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 16

LIU, L.; HE, M.; YUE, X.; NING, B.; WAN, W. Ionosphere around equinoxes during low solar activity. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 115, n. A9, 2010. 87

MONICO, J. a. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 2, 21, 22, 23, 25, 29, 32

NAVA, B.; COISSON, P.; RADICELLA, S. A new version of the nequick ionosphere electron density model. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 70, n. 15, p. 1856–1862, 2008. 35, 39

NEGRETI, P. M. d. S. **Estudo do conteúdo eletrônico total na região brasileira em períodos magneticamente perturbados**. 323 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012-03-28 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/05.10.21.43>>. Acesso em: 05 abr. 2018. 48

NISHIDA, A. Coherence of geomagnetic dp 2 fluctuations with interplanetary magnetic variations. **Journal of Geophysical Research**, Wiley Online Library, v. 73, n. 17, p. 5549–5559, 1968. 18

OLATUNJI, E. The total columnar electron content of the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 277–285, 1967. 109

OTSUKA, Y.; OGAWA, T.; SAITO, A.; TSUGAWA, T.; FUKAO, S.; MIYAZAKI, S. A new technique for mapping of total electron content using gps network in japan. **Earth, planets and space**, The Seismological Society of Japan, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences, The Volcanological Society of Japan, The Geodetic Society of Japan, The Japanese Society for Planetary Sciences, v. 54, n. 1, p. 63–70, 2002. 34, 35, 36, 37

OTT, E. Theory of rayleigh-taylor bubbles in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 83, n. A5, p. 2066–2070, 1978. 11

PARKINSON, B. W. **Progress in astronautics and aeronautics: Global positioning system: Theory and applications**. [S.l.]: Aiaa, 1996. 2

RADICELLA, S.; LEITINGER, R. The evolution of the dgr approach to model electron density profiles. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 27, n. 1, p. 35–40, 2001. 39

RADICELLA, S. M.; ZHANG, M.-L. The improved dgr analytical model of electron density height profile and total electron content in the ionosphere. 38/1, 1995. 38

RAWER, K. Replacement of the present sub-peak plasma density profile by a unique expression. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 2, n. 10, p. 183–190, 1982. 39

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. Introduction to ionospheric physics. **IEEE Transactions on Image Processing**, 1969. 1, 7, 10, 14, 15

ROB. **Royal observatory of Belgium GNSS**. 2017. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018. Disponível em: <<http://gnss.be>>. 33

RODRIGUES, F. Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais gps. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS**, 2003. 2

ROSS, W. J. Measurement of electron content at the magnetic equator. **Journal of Geophysical Research**, Wiley Online Library, v. 71, n. 15, p. 3671–3676, 1966. 109

SEEBER, G. Books-received-satellite geodesy-foundations methods and applications. **Science**, v. 262, p. 775, 1993. 27

\_\_\_\_\_. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. [S.l.]: Walter de Gruyter, 2003. 22

SEEMALA, G.; VALLADARES, C. Statistics of total electron content depletions observed over the south american continent for the year 2008. **Radio Science**, Wiley Online Library, v. 46, n. 5, 2011. 34, 38

VALLADARES, C.; VILLALOBOS, J.; HEI, M.; SHEEHAN, R.; BASU, S.; MACKENZIE, E.; DOHERTY, P.; RIOS, V. Simultaneous observation of traveling ionospheric disturbances in the northern and southern hemispheres. **Ann. Geophys.**, v. 27, p. 1501–1508, 2009. 37

WU, B.-H.; CHU, V.; CHEN, P.; TING, T. Formosat-3/cosmic science mission update. **GPS solutions**, Springer, v. 9, n. 2, p. 111–121, 2005. 8



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

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

### **Manuais Técnicos (MAN)**

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

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

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

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

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

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

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

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

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

### **Programas de Computador (PDC)**

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

### **Pré-publicações (PRE)**

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