



FCT/UNESP
Presidente Prudente
Brasil



FCAG/UNLP
La Plata
Argentina
GESA

COMPARAÇÃO DOS MODELOS IONOSFÉRICOS DESENVOLVIDOS NA FCAG/UNLP E NA FCT/UNESP

*Paulo Oliveira CAMARGO; Claudio Antonio BRUNINI
Francisco Javier AZPILICUETA; João Francisco Galera
MONICO*

**SIRGAS – Taller GTI
26 / Maio / 2008**

CONTEÚDO

CONSIDERAÇÕES

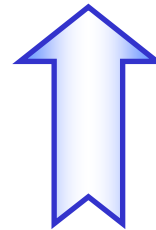
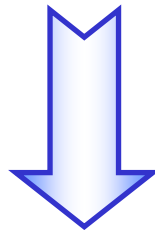
MODELOS: MOD_ION e LPIM

EXPERIMENTOS E ANÁLISES

CONCLUSÕES

CONSIDERAÇÕES

IONOSFERA



Uma das maiores fontes de erro nas observáveis GNSS

CONSIDERAÇÕES

**ERRO DEVIDO À IONOSFERA
NAS OBSERVÁVEIS GNSS É
PROPORCIONAL AO
CONTEÚDO TOTAL DE ELÉTRONS (TEC),
PRESENTES NA IONOSFERA, E
INVERSAMENTE PROPORCIONAL AO
QUADRADO DA FREQUÊNCIA DO SINAL (f^2).**

CONSIDERAÇÕES

➤ Erro:

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}$$

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}$$

- TEC – número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o satélite até o receptor, e cuja área da base é unitária (1 m²).

$$1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ el/m}^2$$

GPS: $L_1 = \pm 0,162 \text{ m}$ $L_2 = \pm 0,267 \text{ m}$

GLONASS $L_1 = \pm 0,157 \text{ m} \dots\dots\dots 0,156 \text{ m}$

$L_2 = \pm 0,259 \text{ m} \dots\dots\dots 0,258 \text{ m}$

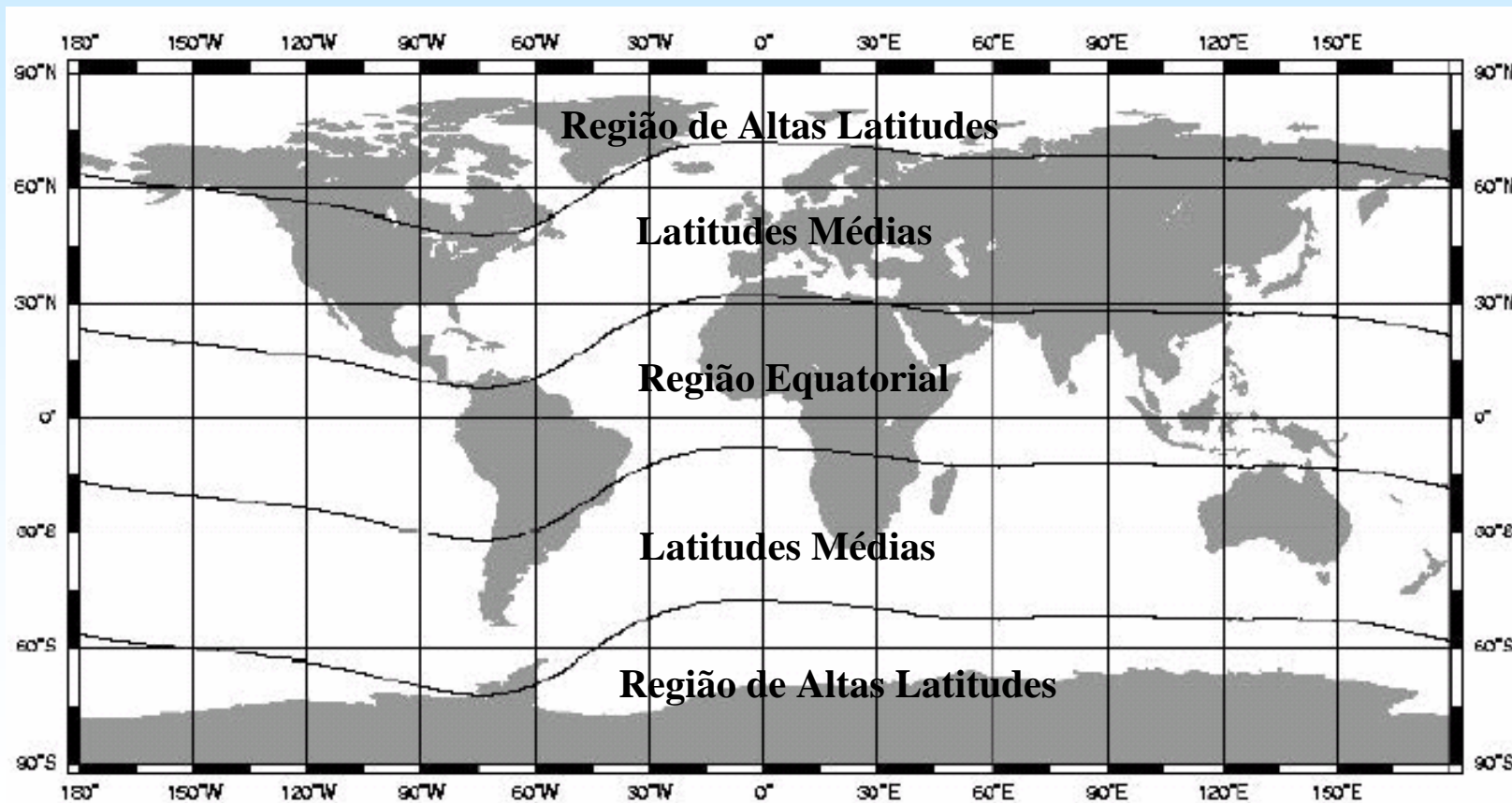
CONSIDERAÇÕES

➤ Variações Temporais:

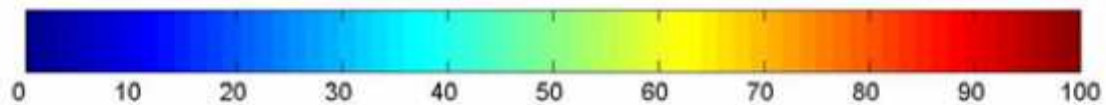
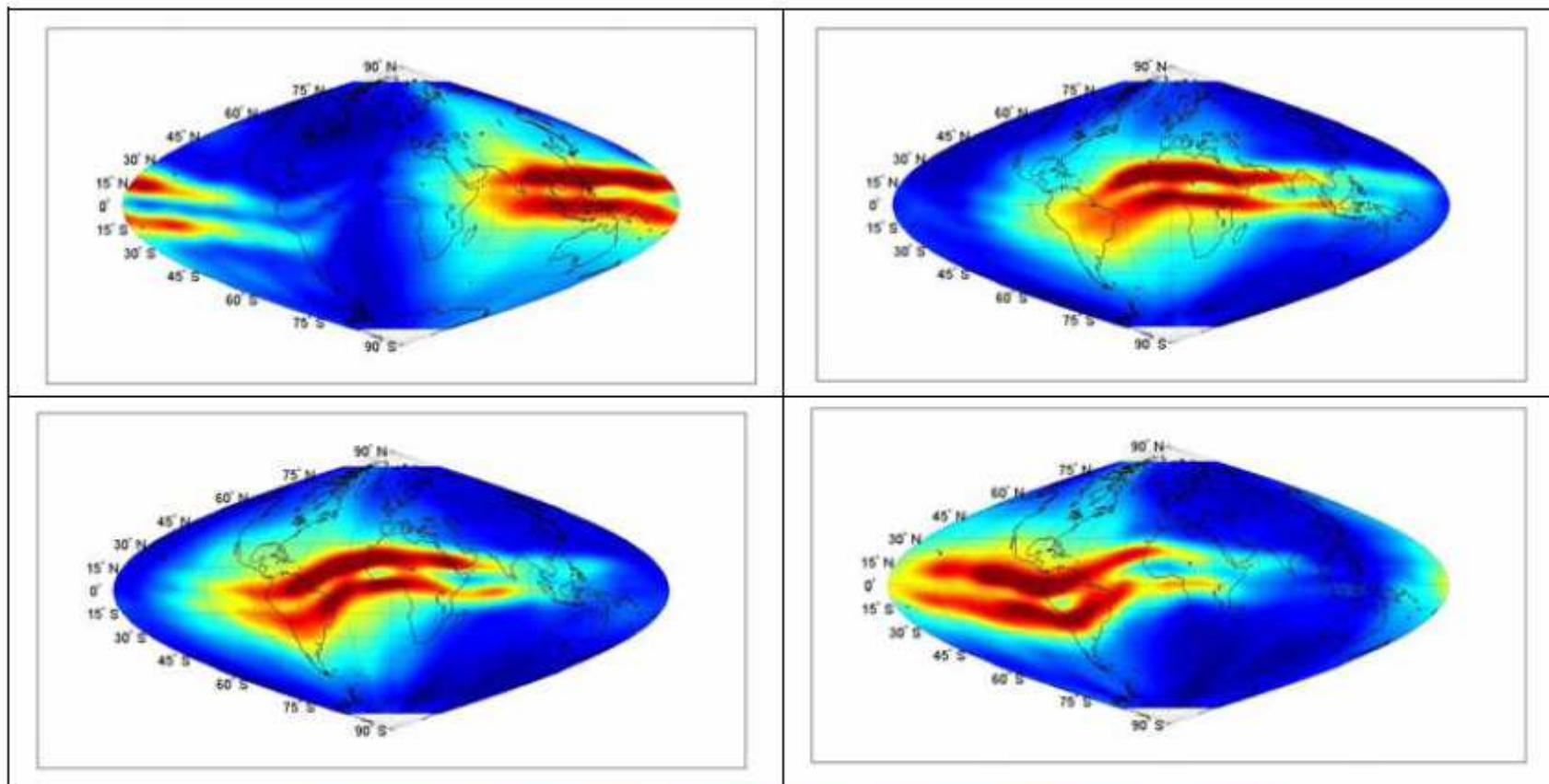
- **Variação diurna:** devido à iluminação do Sol;
- **Variação sazonal:** devido à mudança do ângulo zenital do Sol;
- **Ciclos de longos períodos:** estão associados às ocorrências de manchas solares.

CONSIDERAÇÕES

➤ Variações Espaciais:



CONSIDERAÇÕES



CONSIDERAÇÕES

- **Estratégias: minimizar o efeito da ionosfera:**
 - Modelo de Klobuchar (*Broadcast*);
 - Modelos derivados das observáveis GNSS:
 - Regionais: América do Sul - LPIM e Mod_Ion;
 - Global: GIM - IGS (*IONEX*):
 - CODE- *Centre for Orbit Determination in Europe*;
 - ESA – *European Space Agency*;
 - JPL - *Jet Propulsion Laboratory*;
 - UPC – *Universidad Politécnica de Cataluña*;

OBJETIVOS

- Apresentar os modelos ionosféricos desenvolvidos na Argentina e no Brasil, nos departamentos:
 - Geodesia Espacial y Aeronomia da FCAG/UNLP – LPIM; e
 - Cartografia da FCT/UNESP – Mod_Ion.
- Comparar o TEC estimado envolvendo algumas estações da Rede SIRGAS da América do Sul.

Mod_Ion – Modelo Regional da Ionosfera

- Ionosfera representada - Série de Fourier;
- Ajustamento pelo MMQ;
- Estima IFB dos satélites e dos receptores;
- Combinação linear livre da geometria da pseudodistância suavizada pela fase;
- Latitude => geográfica;
- Altitude da camada ionosférica => 400 km.

Mod_Ion

➤ Cálculo do TEC a partir da pseudodistância:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + I_{1r}^s + S_{p1}^s + R_{p1} + \varepsilon_{P1}$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + I_{2r}^s + S_{p2}^s + R_{p2} + \varepsilon_{P2}$$

≠

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{2r}^s - I_{1r}^s + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1}) + \varepsilon_{p12}$$



$$I_{2r}^s - I_{1r}^s = 40.3 \text{ TEC}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} = I_{1r}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}$$

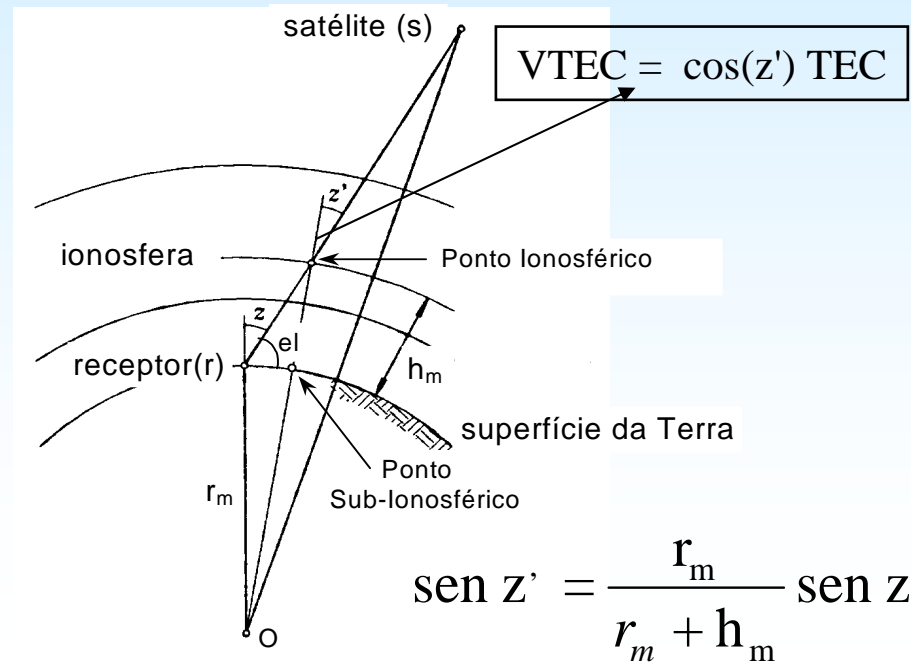
Mod_Ion

➤ Cálculo do TEC a partir da pseudodistância:

$$F^{\text{TEC}} (P_{2r}^s - P_{1r}^s) = \text{TEC}_r^s + F^{\text{TEC}} [(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F^{\text{TEC}} \epsilon_{P21}$$

$$F^{\text{TEC}} = f_1^2 f_2^2 / 40,3 (f_1^2 - f_2^2)$$

$$\text{TEC}_r^s = \frac{\text{VTEC}}{\cos(z'_s)_r} = sf(z') \text{VTEC}$$



Mod_Ion

$$F^{\text{TEC}} (P_{2r}^s - P_{1r}^s) = \frac{\text{VTEC}}{\cos(Z^s)_r} + F^{\text{TEC}} [(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F^{\text{TEC}} \epsilon_{P21}$$

$$\text{VTEC} = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=4} \{a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)\} +$$

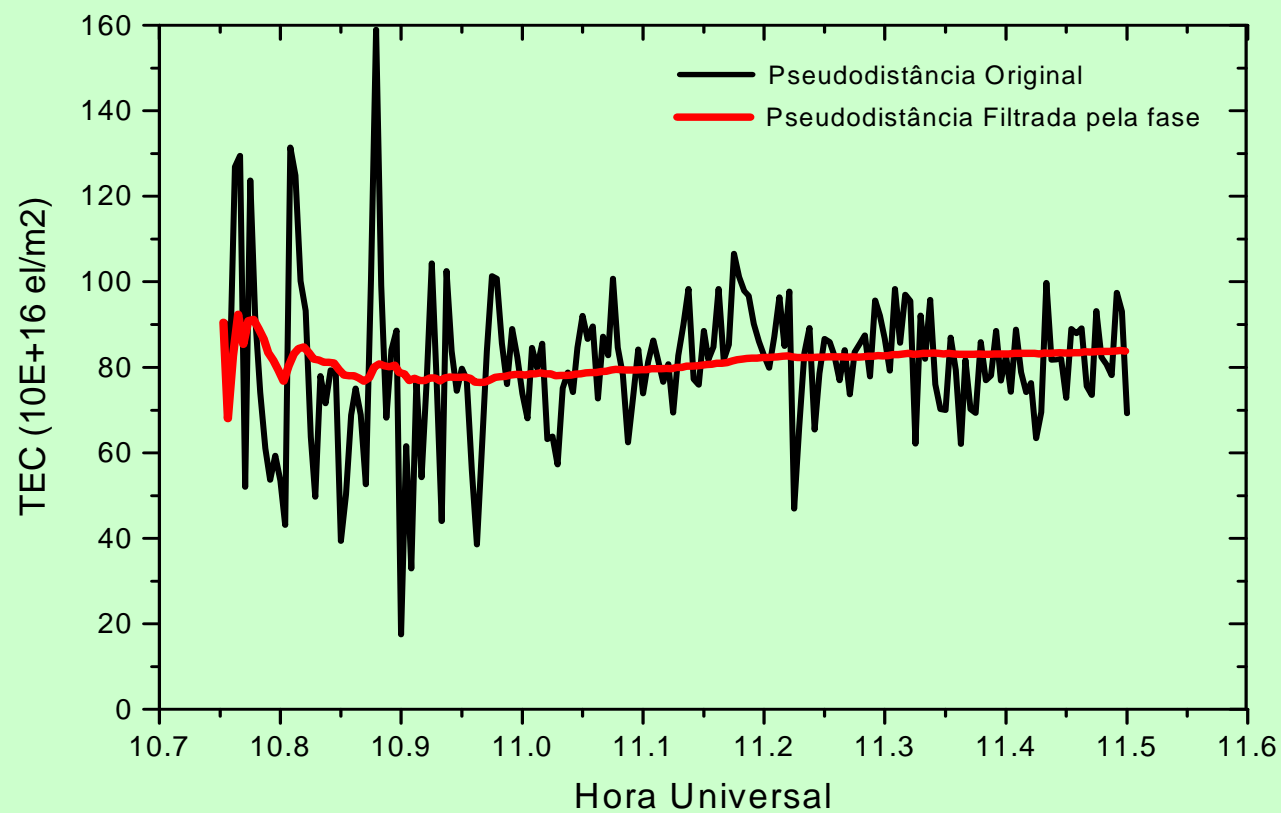
$$a_{n*2+3} h^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+10}}^{m=4} \{a_j \cos(i B^s) + a_{j+1} \sin(i B^s)\}$$

Mod_Ion

- Parâmetros: $19+r+s \Rightarrow$ (estimados a cada 24 hs):
 - 19 coeficientes da série (a_1, a_2, \dots, a_{19});
 - r IFB devido aos receptores, igual ao número de receptores;
 - s IFB dos satélites, igual ao número de satélites rastreados.

Mod_Ion

Pseudodistância x Pseudodistância Suavizada pela Fase:



LPIM – *La Plata Ionospheric Model*

- Ionosfera representada - Harmônicos esféricos ;
- Ajustamento pelo MMQ;
- Estima IFB dos satélites e dos receptores;
- Combinação linear livre da geometria para a fase e para a pseudodistância = > combinadas com base na técnica denominada de “nivelamento” da fase;
- Latitude => Modip (*Modified Dip Latitude*);
- Altitude da camada ionosférica => 450 km.

LPIM

➤ Cálculo do TEC

$$P_{i4}^k = s\text{TEC} + b_i + b^k + \varepsilon_P$$

$$L_{i4}^k = s\text{TEC} + B_i + B^k + C_{\text{arc}} + \varepsilon_L$$

➤ C_{arc} é constante sobre um arco contínuo:

$$\langle L_4 - P_4 \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N (L_4 - P_4)$$

$$\langle L_4 - P_4 \rangle_{\text{arc}} = C_{\text{arc}} + B_i - b_i + B^k - b^k$$

➤ Medida ionosférica da fase “nivelada” pelo código:

$$\tilde{L}_4 = L_4 - \langle L_4 - P_4 \rangle_{\text{arc}} = s\text{TEC} + b_i + b^k + \varepsilon_L$$

LPIM

$$\tilde{L}_{4i}^k = sf(z') \text{vTEC}(h, \varphi) + b_i + b^k + \varepsilon_L$$

$$\text{vTEC}(h, \varphi) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^l \left(\alpha_{lm} \cos\left(2\pi \frac{mh}{24}\right) + \beta_{lm} \sin\left(2\pi \frac{mh}{24}\right) \right) P_{lm}(\sin\varphi)$$

- h - ângulo horário no sistema solar fixo;
- φ - latitude do ponto ionosférico (IP):

$$\tan \mu = \frac{I}{\sqrt{\cos \varphi}}$$

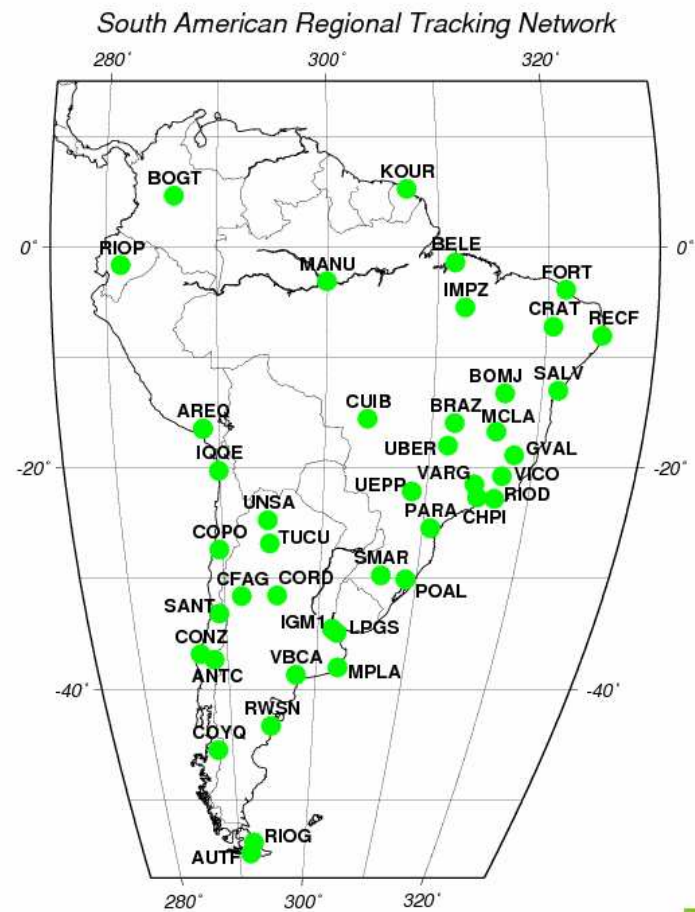
- μ - a latitude modip.

- I é a inclinação magnética.

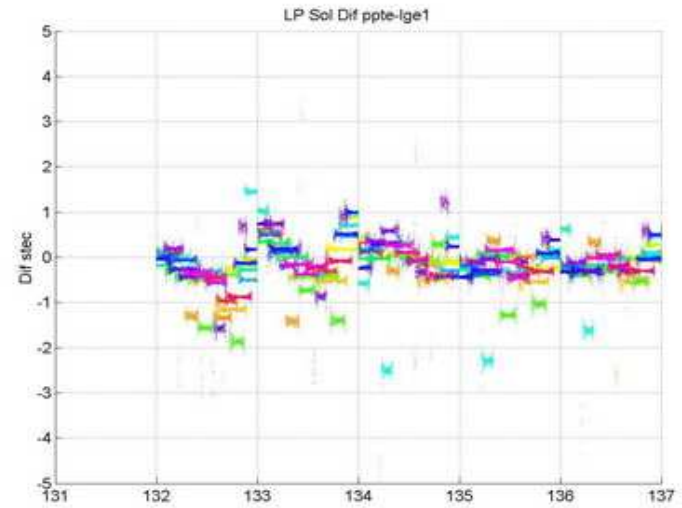
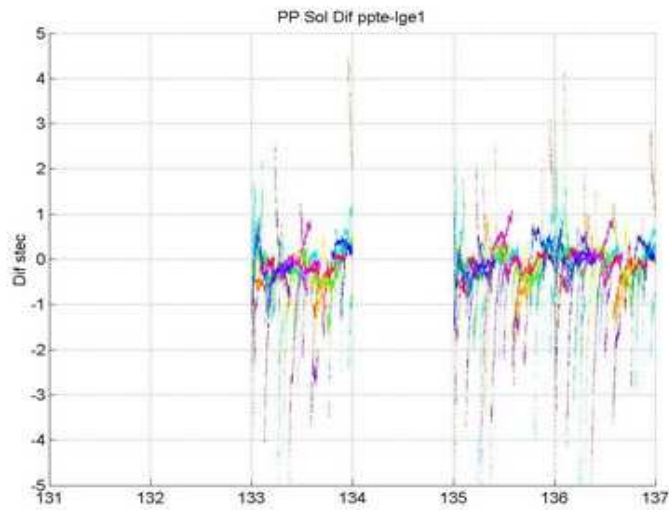
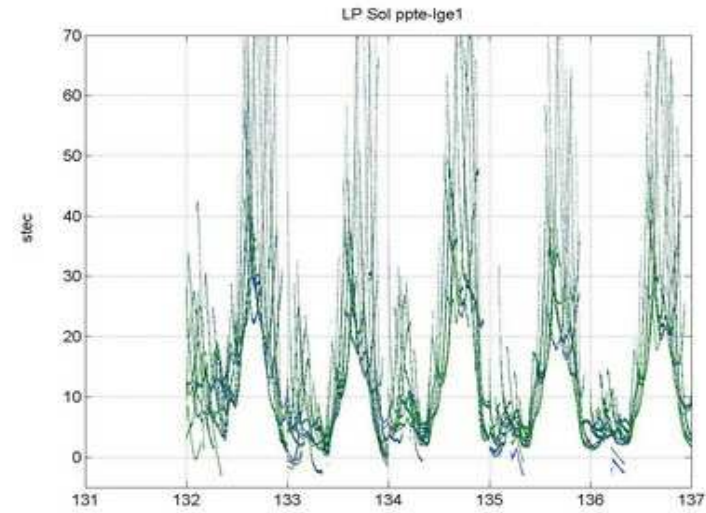
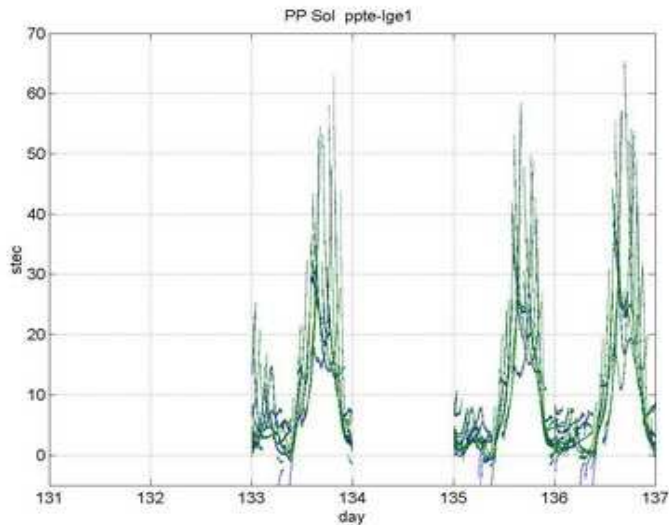
LPIM

- Parâmetros: $256 + b_i + b^k \Rightarrow$ (estimados a cada 1 hs):
 - Série com grau e ordem 15 (α e β);
 - b_i IFB devido aos receptores, igual ao número de receptores;
 - b^k IFB dos satélites, igual ao número de satélites rastreados.

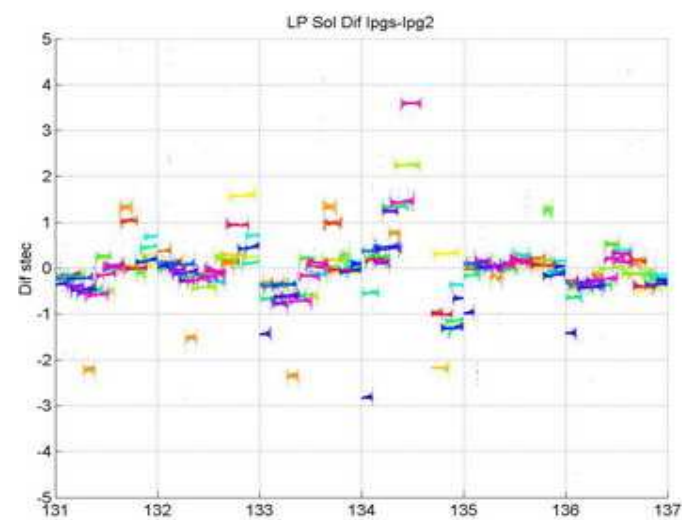
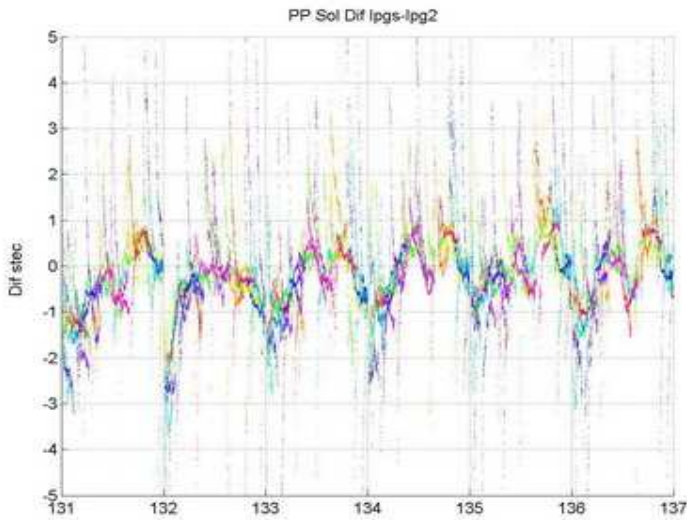
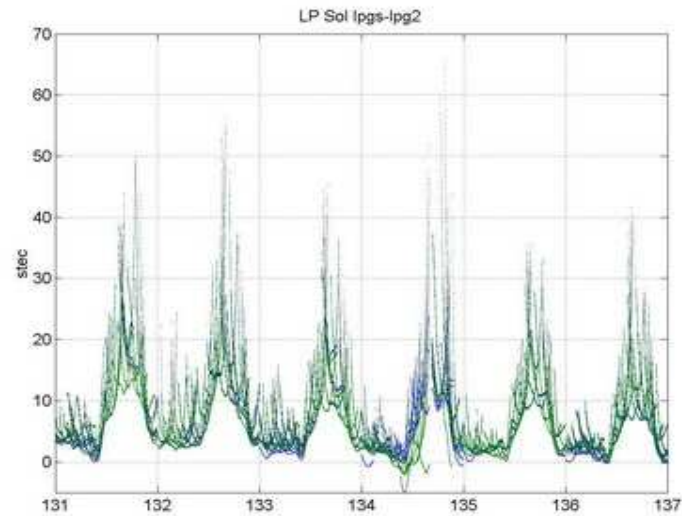
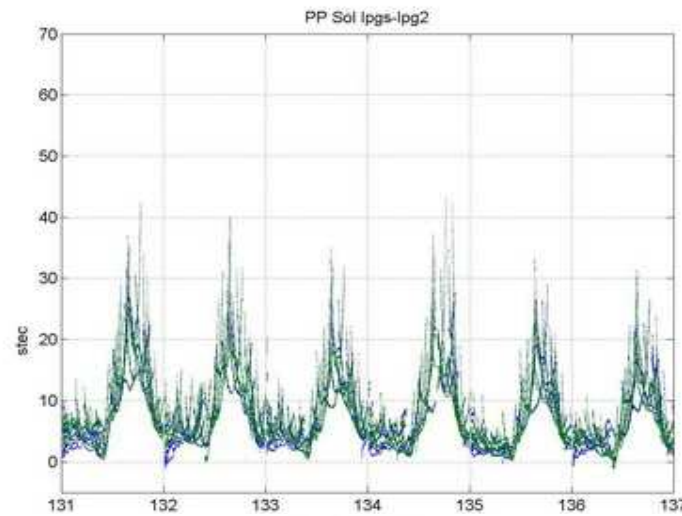
EXPERIMENTOS E ANÁLISES



EXPERIMENTOS E ANÁLISES



EXPERIMENTOS E ANÁLISES



EXPERIMENTOS E ANÁLISES

STEC				
Diferenças	PPTE – LGE1		LPGS – LPG2	
	LPIM	Mod_Ion	LPIM	Mod_Ion
Máxima	3,42	5.8	9,81	9,60
Mínima	-5,23	-9.81	-4,47	-8,44
Média	-0,09	-0.30	0,13	-0,13

CONCLUSÕES

- Diferenças dos modelos:
 - Série para representação analítica de TEC;
 - Sistema de coordenadas;
 - Observáveis: fase nivelada, código filtrado;
 - Altitude da camada ionosférica;
 - Máscara de elevação utilizada.

Muito obrigado pela atenção.