

MODELAGEM FUNCIONAL E ESTOCÁSTICA DE SÉRIES TEMPORAIS PARA A ATUALIZAÇÃO E ESTIMATIVA DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA: APLICAÇÃO NO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO

Gabriela de Oliveira Nascimento Brassarote

Universidade Estadual Paulista (FCT/UNESP)

Programa de Pos-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC)

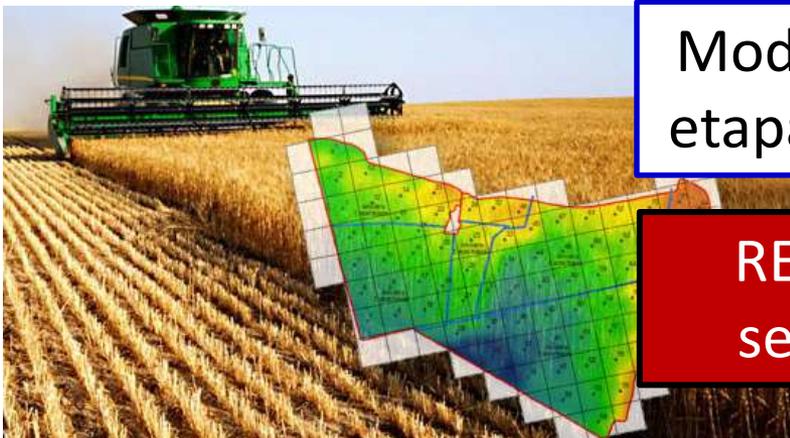
02/10/2020

POSICIONAMENTO GNSS (*Global Navigation Satellite System*)



Melhor qualidade dos equipamentos utilizados no levantamento GNSS

Desenvolvimento de novos métodos de posicionamento



Modelagem adequada dos erros na etapa de processamento dos dados.

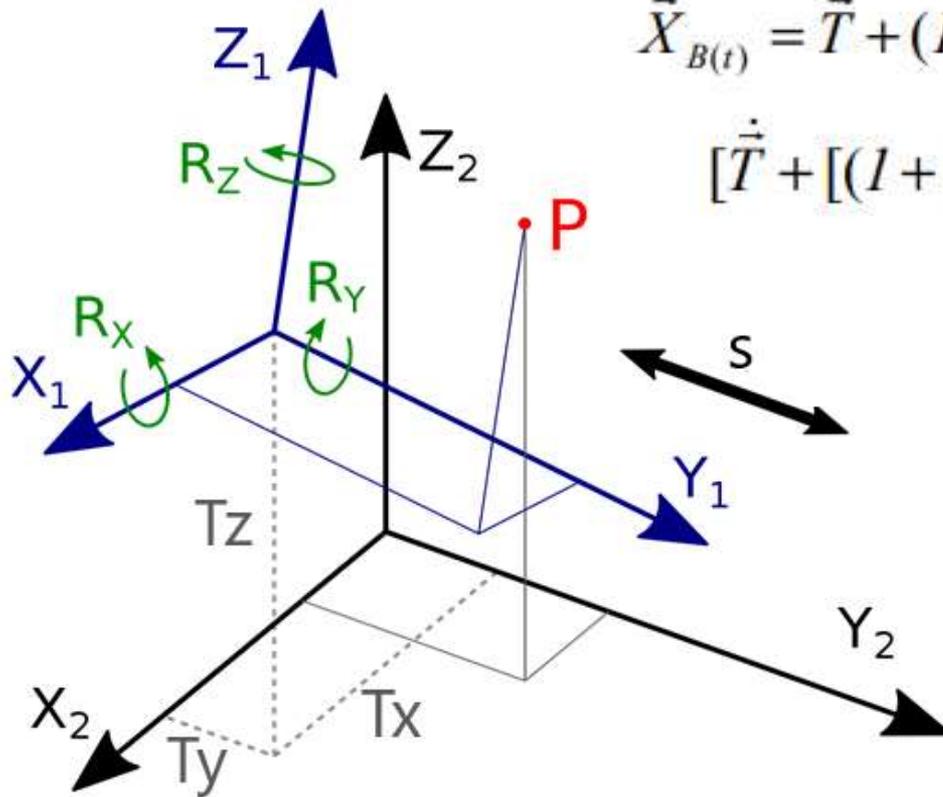
**RESULTADOS MAIS ACURADOS,
sensíveis a pequenas variações**

Compatibilização de coordenadas

Entre referenciais distintos

$$\vec{X}_{B(t)} = \vec{T} + (I + s)[\varepsilon + I][\vec{X}_{A(t_0)} - \vec{V}_{A(t_0)}(t - t_0)] + [\dot{\vec{T}} + [(I + s)\dot{\varepsilon} + \dot{s}[\varepsilon + I]]\vec{X}_{A(t_0)}](t - t_0)$$

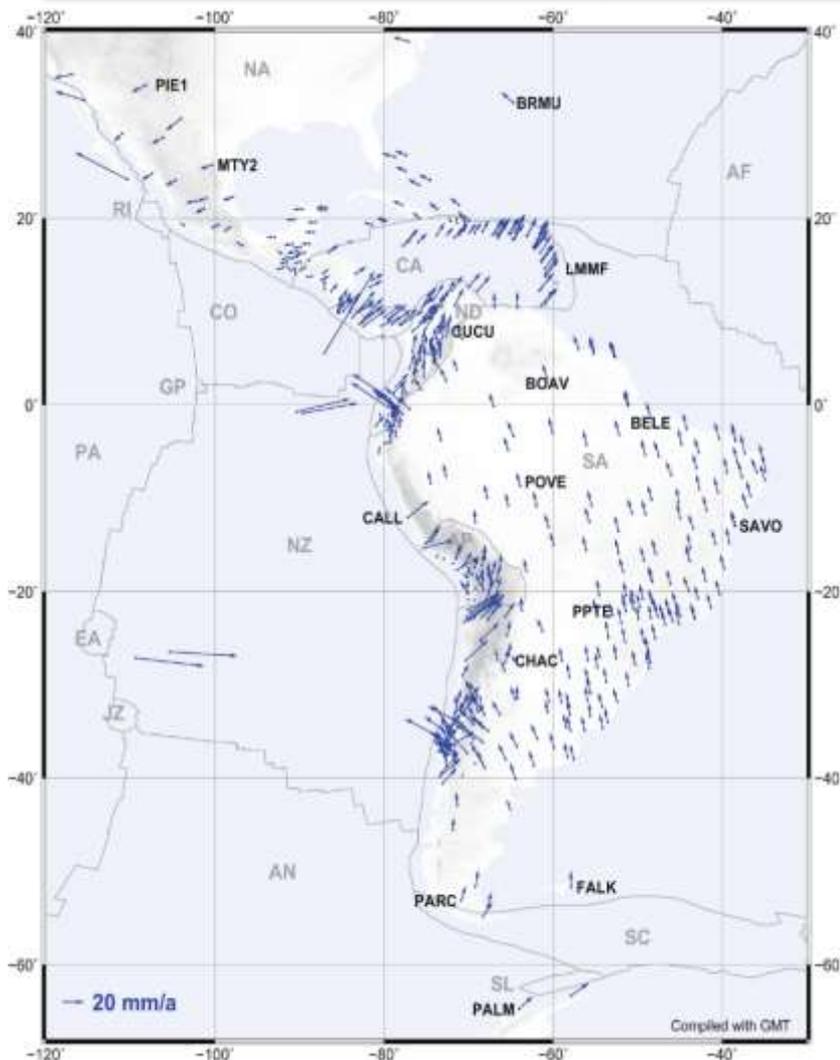
$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0 & Rz & -Ry \\ -Rz & 0 & Rx \\ Ry & -Rx & 0 \end{bmatrix}$$



Entre épocas distintas

$$\vec{X}_{B(t)} = \vec{X}_{A(t_0)} + \vec{V}_{A(t_0)}(t - t_0)$$

Modelo de Velocidade



VEMOS2017

Direção e magnitude do movimento horizontal da crosta

Atualização das componentes planimétricas

Não fornece a evolução temporal da componente altimétrica

Modelo de variação vertical

Estimativa do modelo de variação vertical

Modelo de variação vertical para a posição do usuário

Campo de deformação vertical

Efeitos de natureza periódica - afetam semelhantemente a componente altimétrica de estações próximas

Análise das séries de componente altimétrica das estações GNSS

Identificação dos efeitos periódicos que caracterizam a região de estudo

Modelo que descreva a variação da componente altimétrica

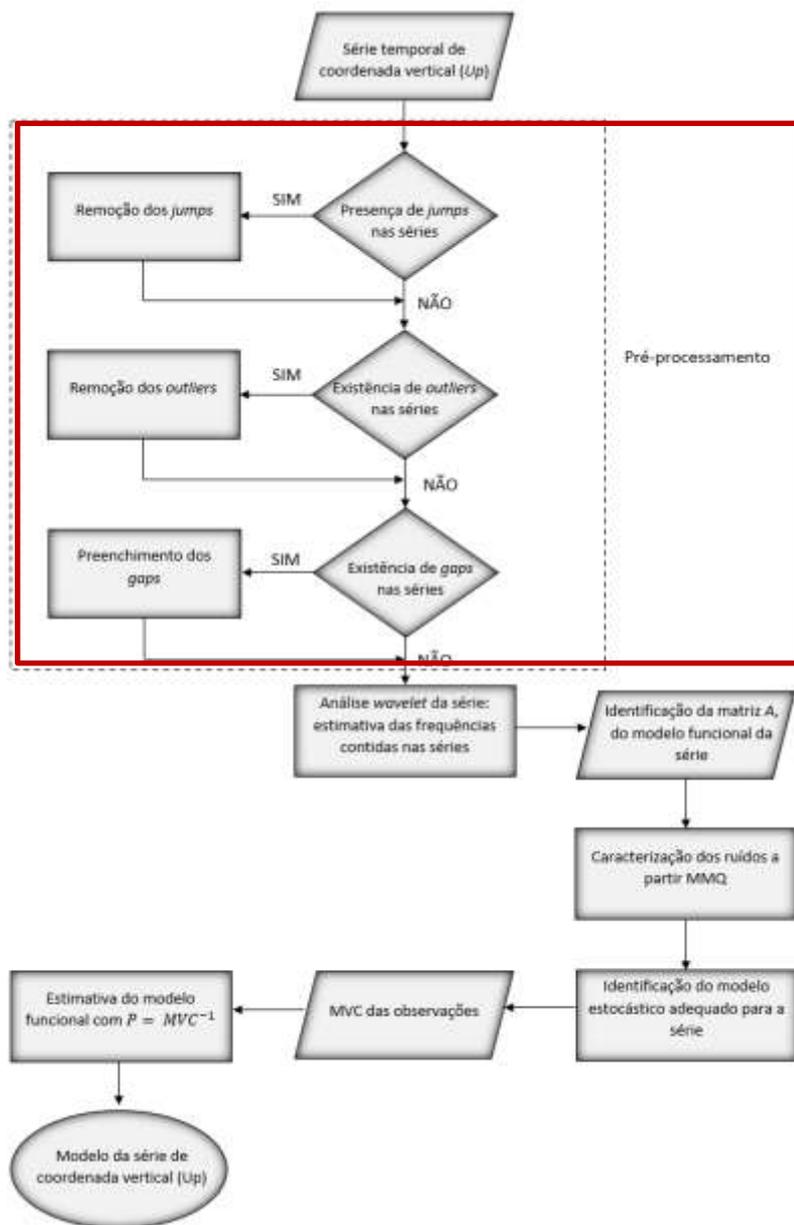
ETAPA 1 - Metodologia

MODELAGEM DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS

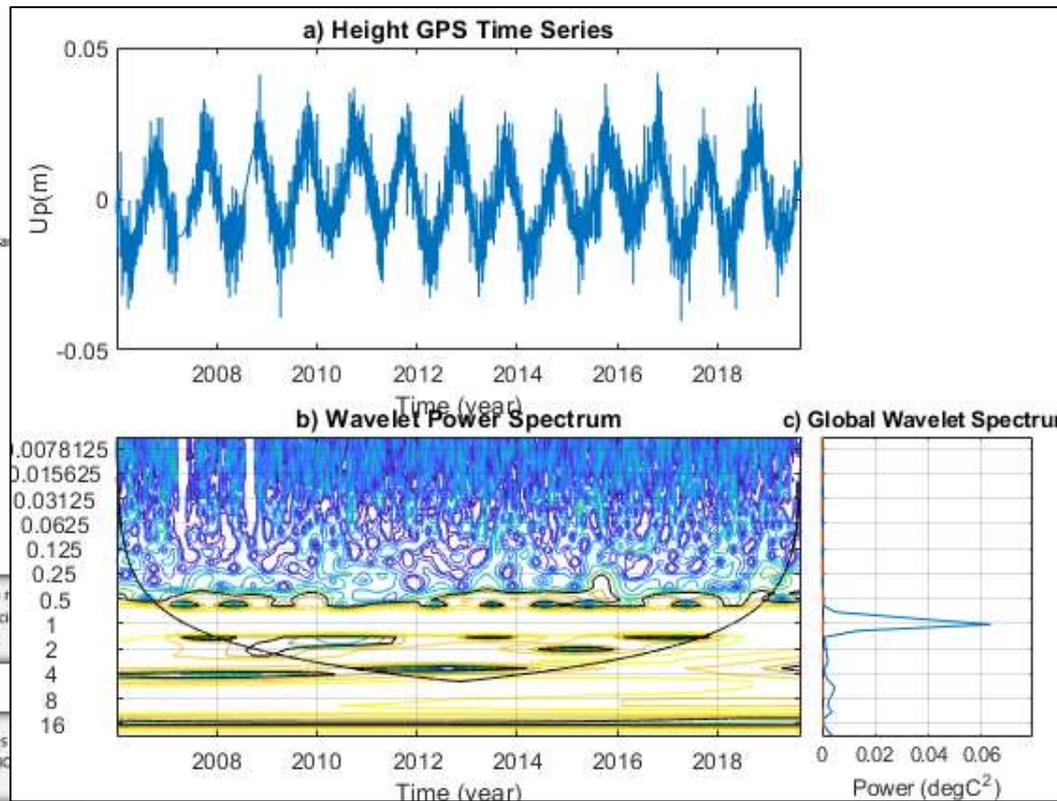
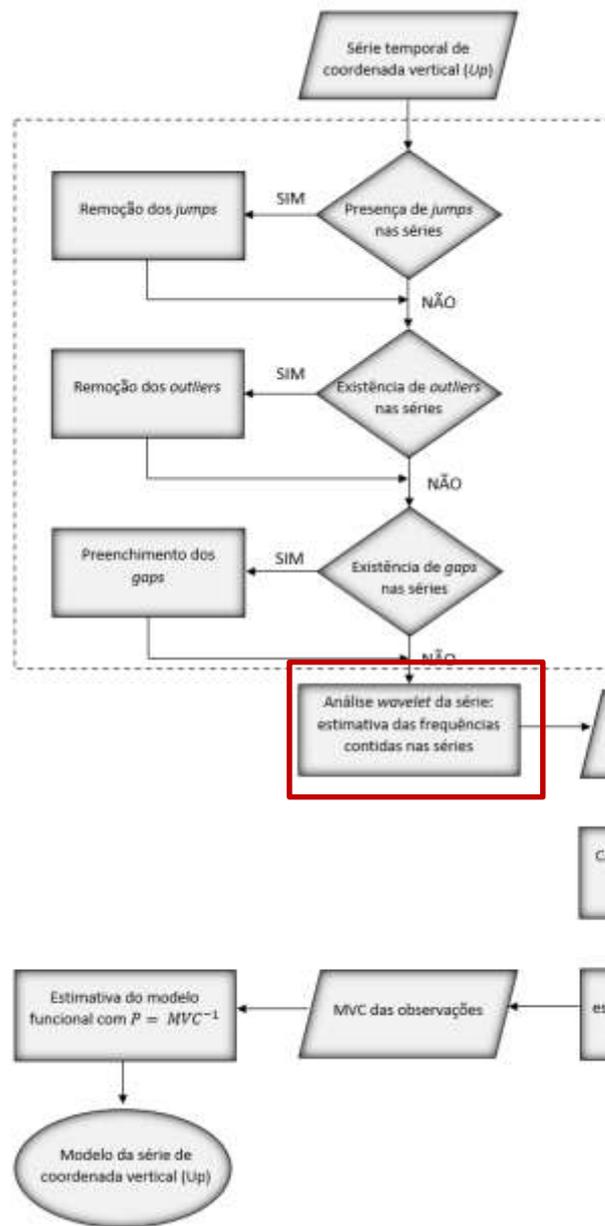
- Construir o modelo que descreva a variabilidade da componente altimétrica de estações GNSS no Brasil, cujas informações serão a base para a estimativa do modelo de variação vertical de um usuário GNSS

$$E(\underline{y}(t)) = y_0 + rt + \sum_{k=1}^q [a_k \cos(\omega_k t) + b_k \text{sen}(\omega_k t)]$$

$$D(\underline{y}) = Q_y = \sum_{k=1}^p \sigma_k Q_k,$$



Análise wavelet



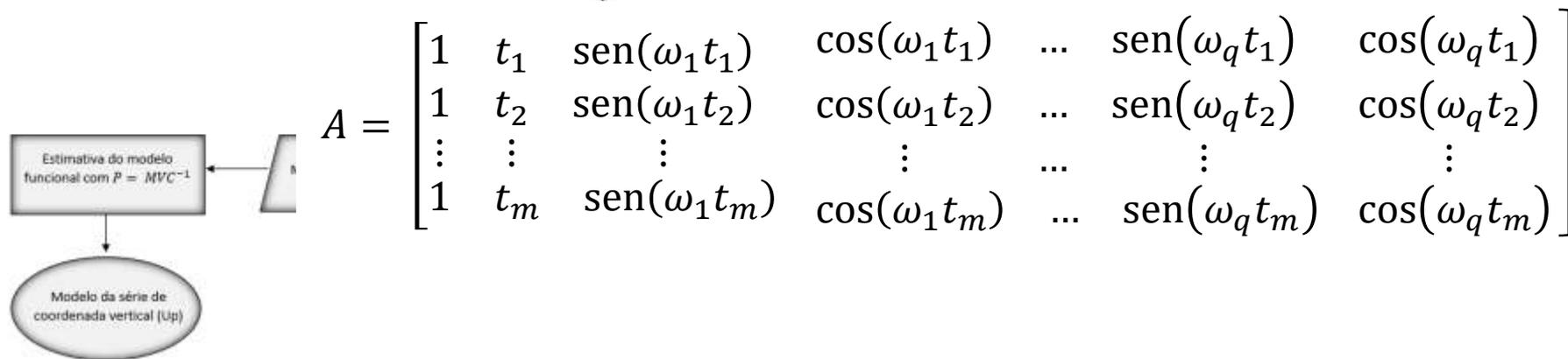
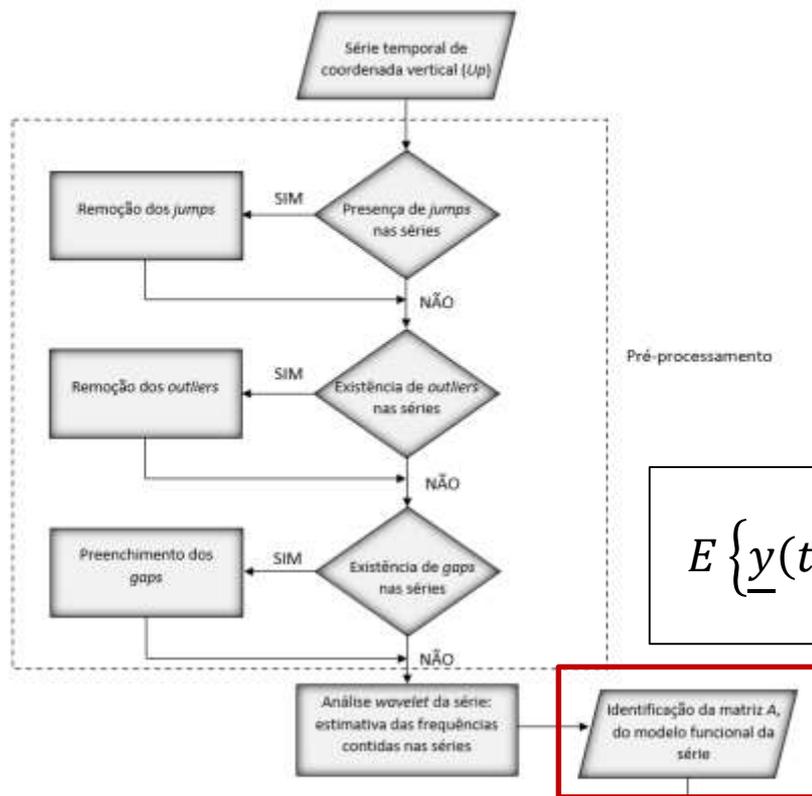
Identificação dos períodos que compõem o efeito periódico da série

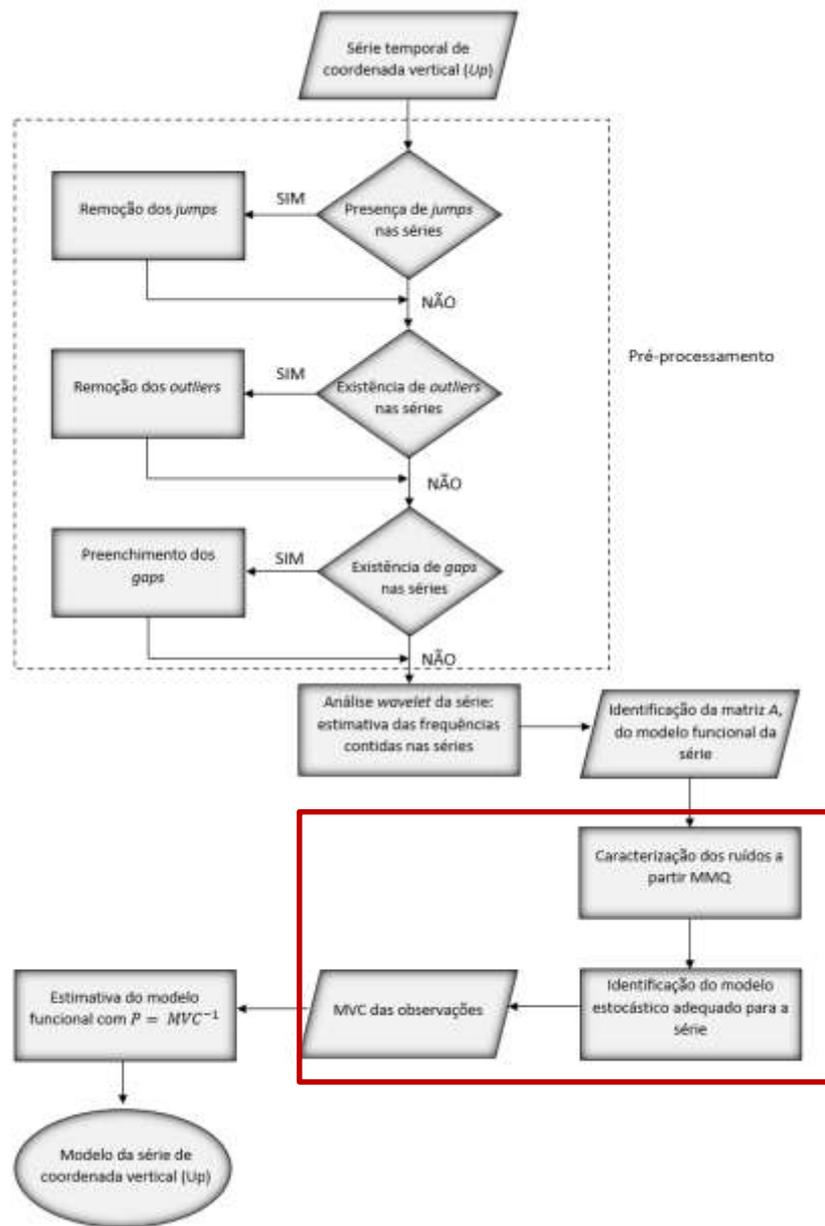
Estimativa das frequências que compõem o modelo funcional

$$f = 1/period$$

$$\omega_k = 2f\pi$$

$$E \{ \underline{y}(t) \} = y_0 + rt + \sum_{k=1}^q [a_k \cos(\omega_k t) + b_k \text{sen}(\omega_k t)]$$





Modelo estocástico

NNLS-VCE

$$Q_y = \sigma_w^2 I + \sigma_f^2 Q_f + \sigma_{rw}^2 Q_{rw}$$

$$P = Q_y^{-1}$$

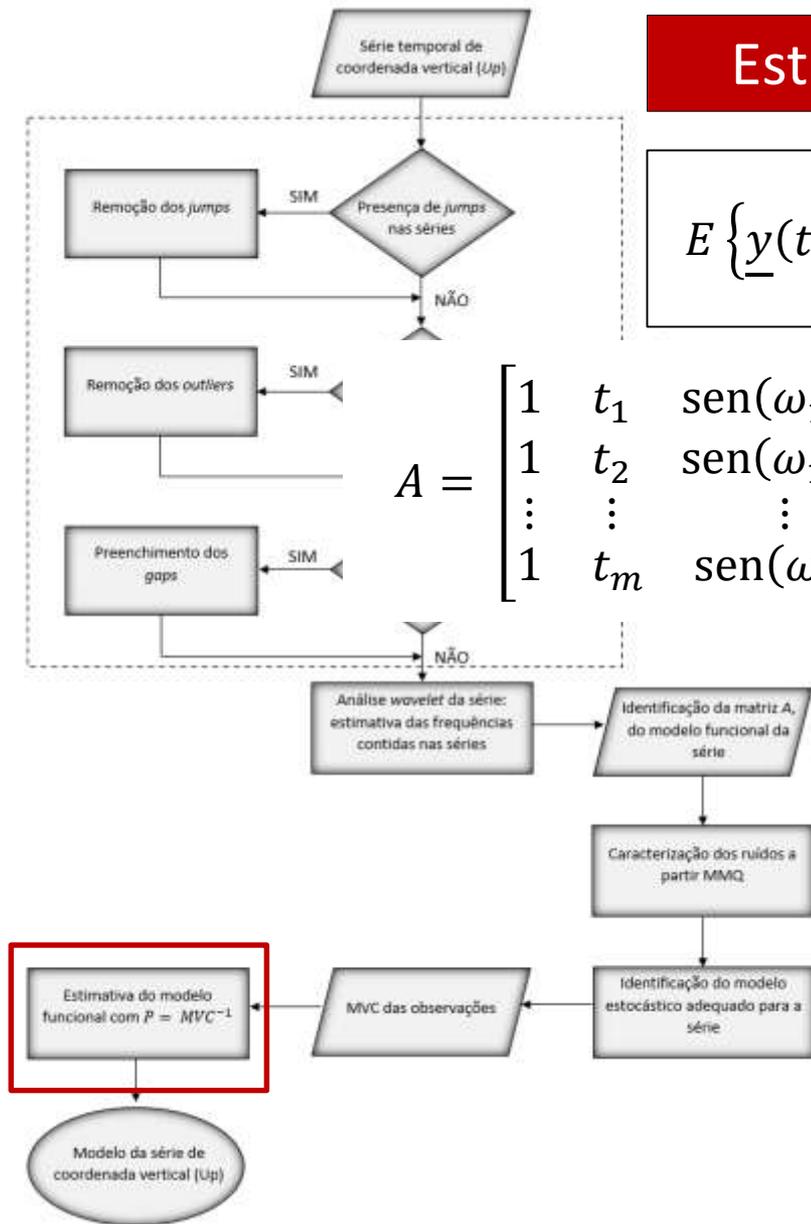
Estimativa dos parâmetros do modelo

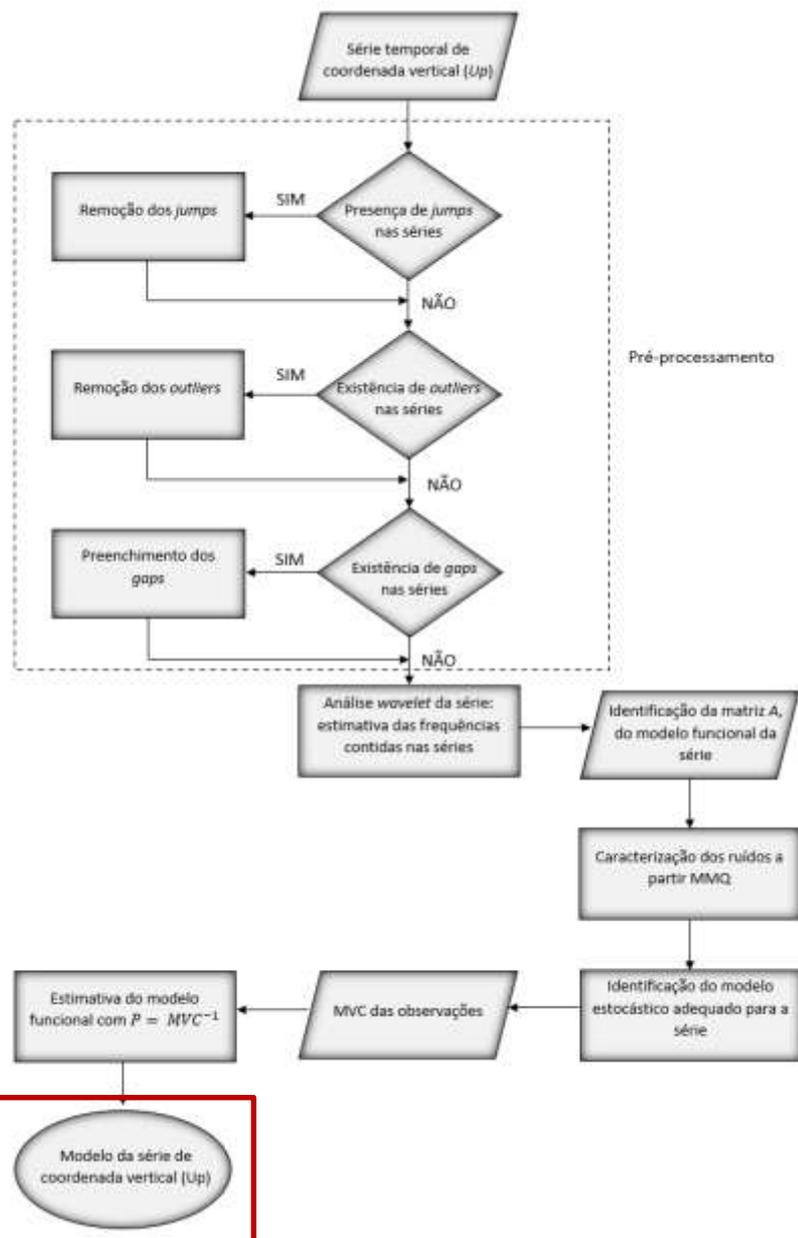
$$E \{ \underline{y}(t) \} = y_0 + rt + \sum_{k=1}^q [a_k \cos(\omega_k t) + b_k \text{sen}(\omega_k t)]$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \text{sen}(\omega_1 t_1) & \cos(\omega_1 t_1) & \dots & \text{sen}(\omega_q t_1) & \cos(\omega_q t_1) \\ 1 & t_2 & \text{sen}(\omega_1 t_2) & \cos(\omega_1 t_2) & \dots & \text{sen}(\omega_q t_2) & \cos(\omega_q t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_m & \text{sen}(\omega_1 t_m) & \cos(\omega_1 t_m) & \dots & \text{sen}(\omega_q t_m) & \cos(\omega_q t_m) \end{bmatrix}$$

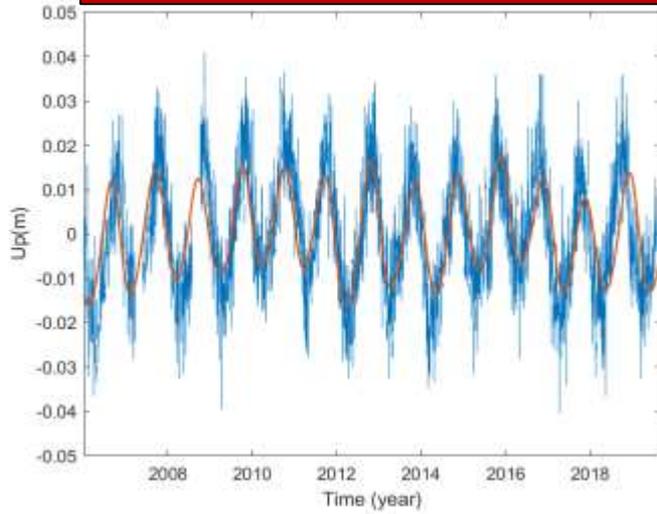
$$X = [y_0 \ r \ a_1 \ b_1 \ \dots \ a_q \ b_q]^t$$

$$X = -(A^t P A)^{-1} A^t P L$$

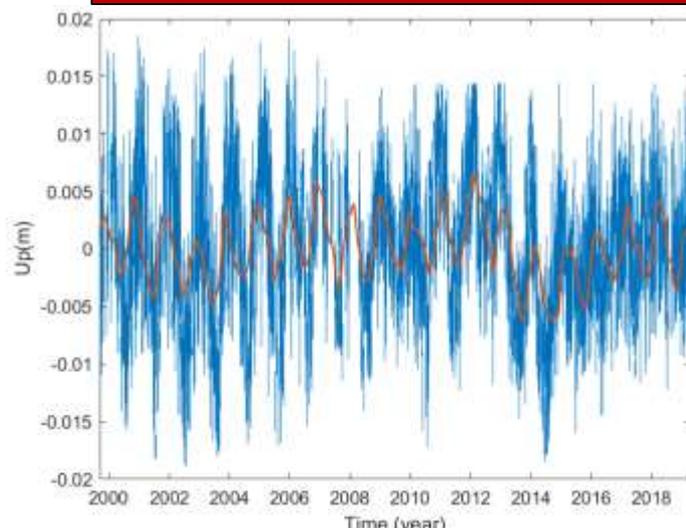




POVE



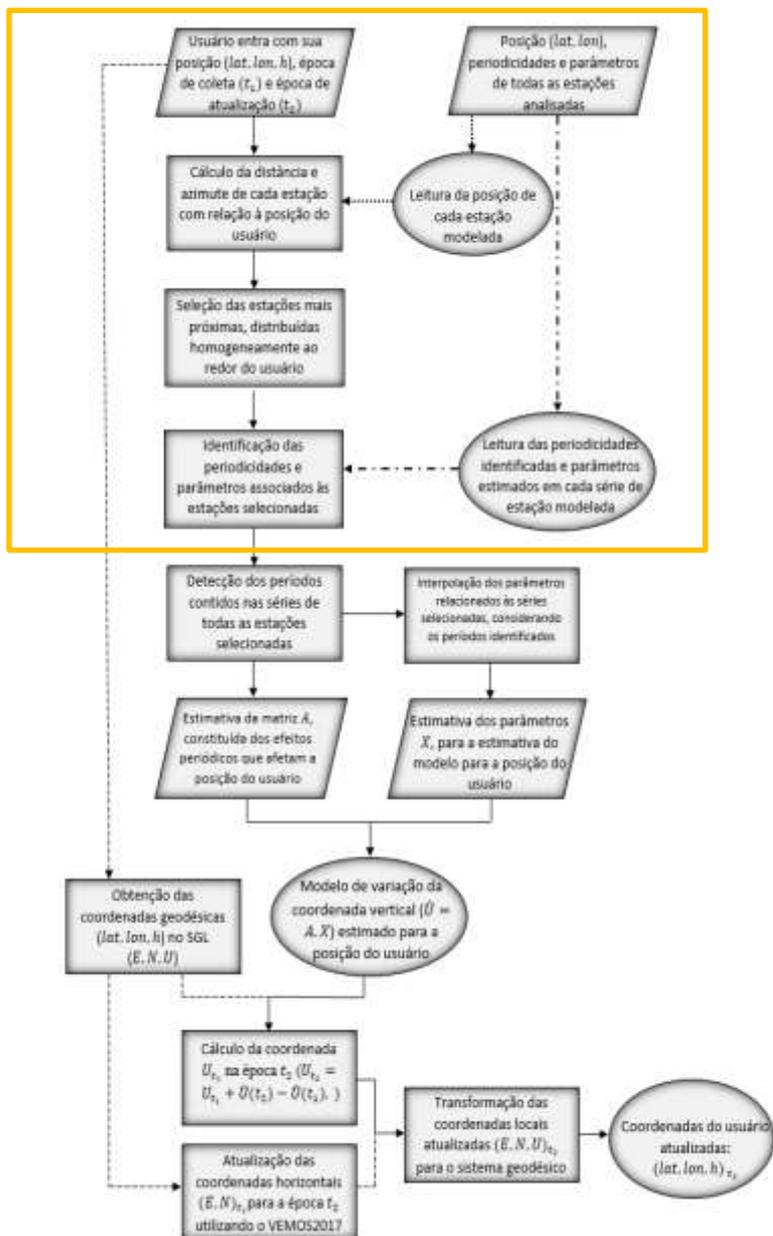
POAL

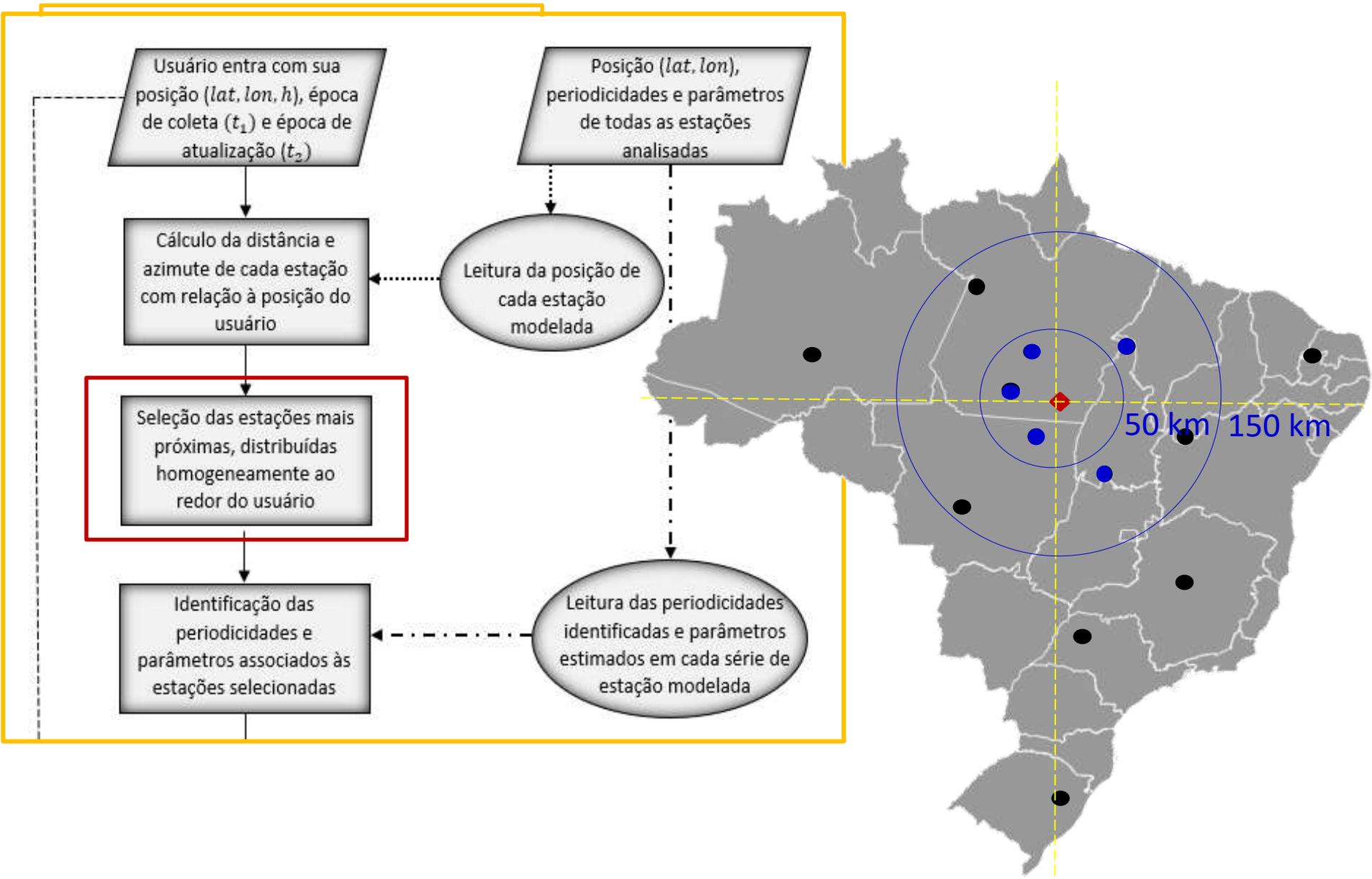


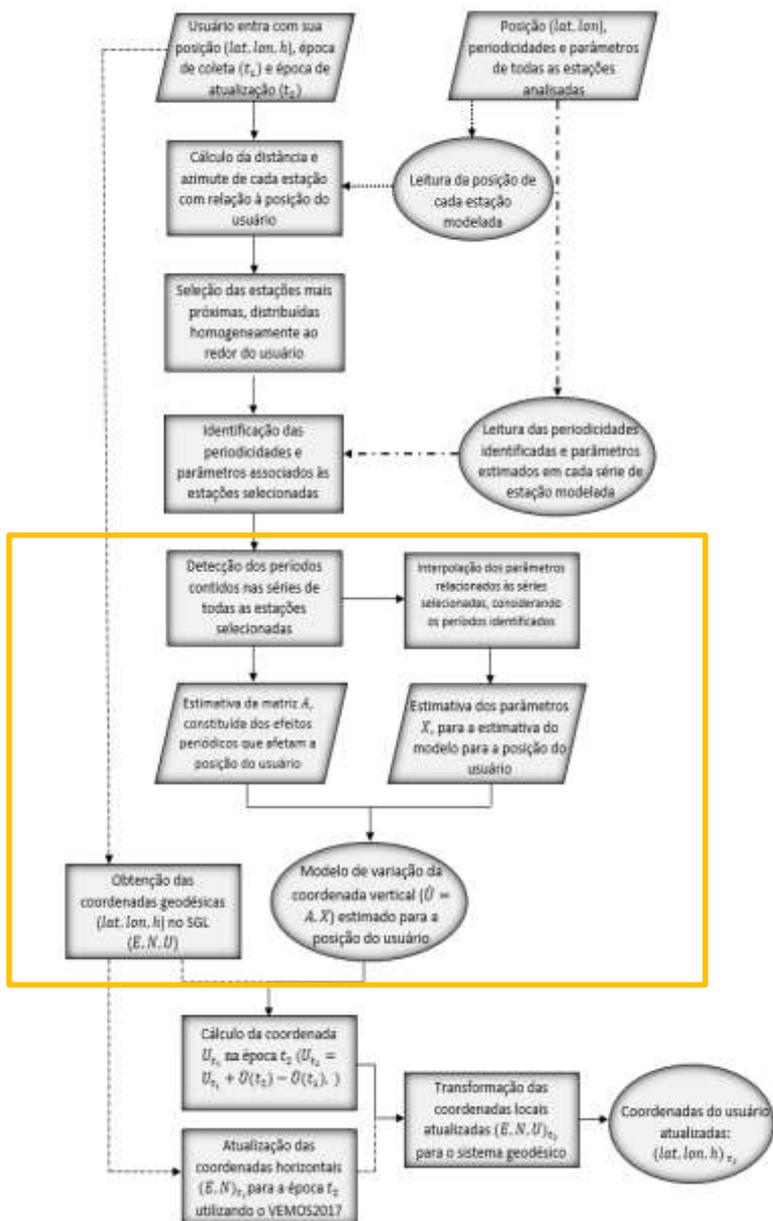
ETAPA 2 - Metodologia

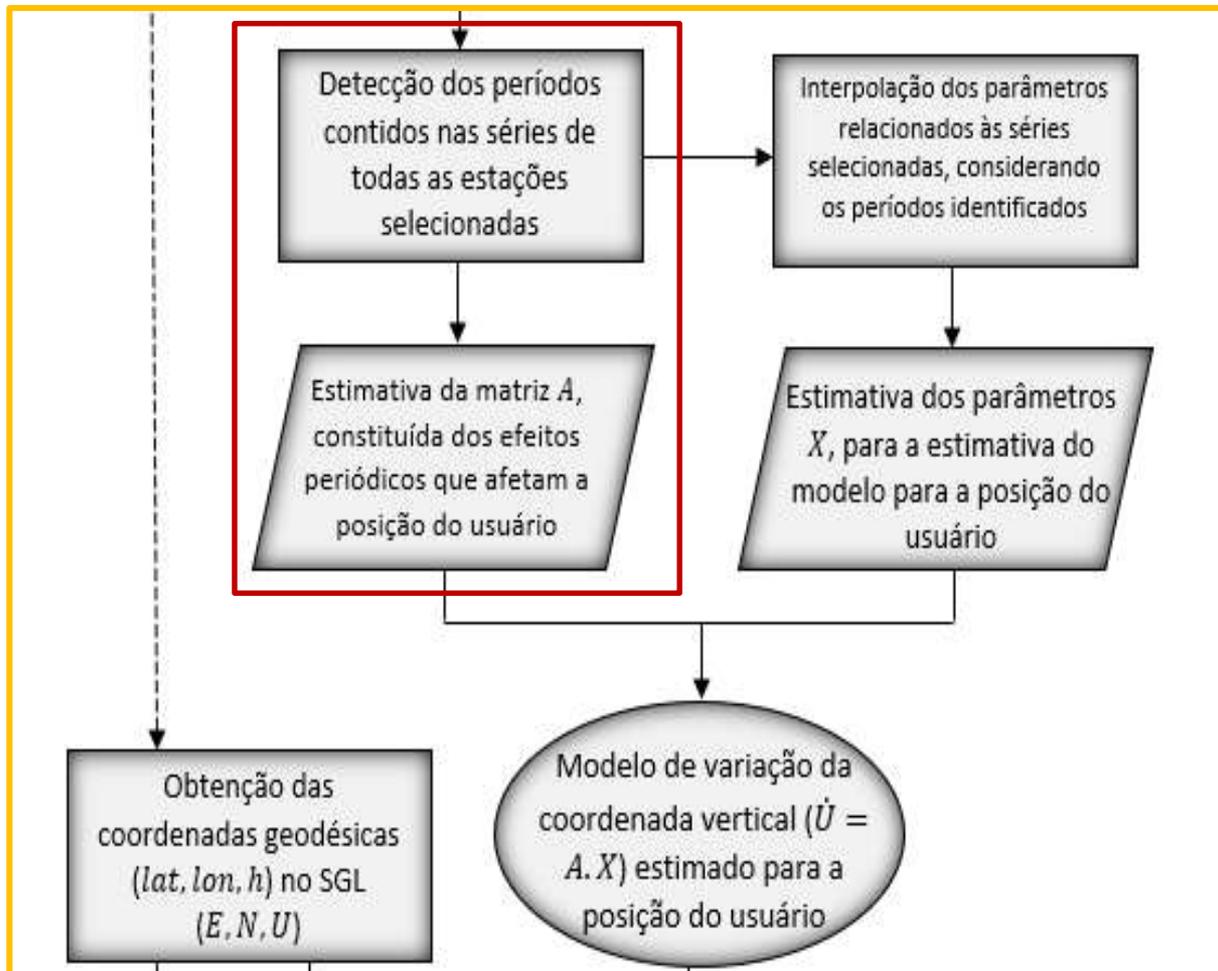
MODELO DE VARIAÇÃO VERTICAL

- Estimativa do modelo de variação vertical de um ponto dentro território brasileiro, sem monitoramento contínuo, visando a atualização da componente altimétrica desse ponto;



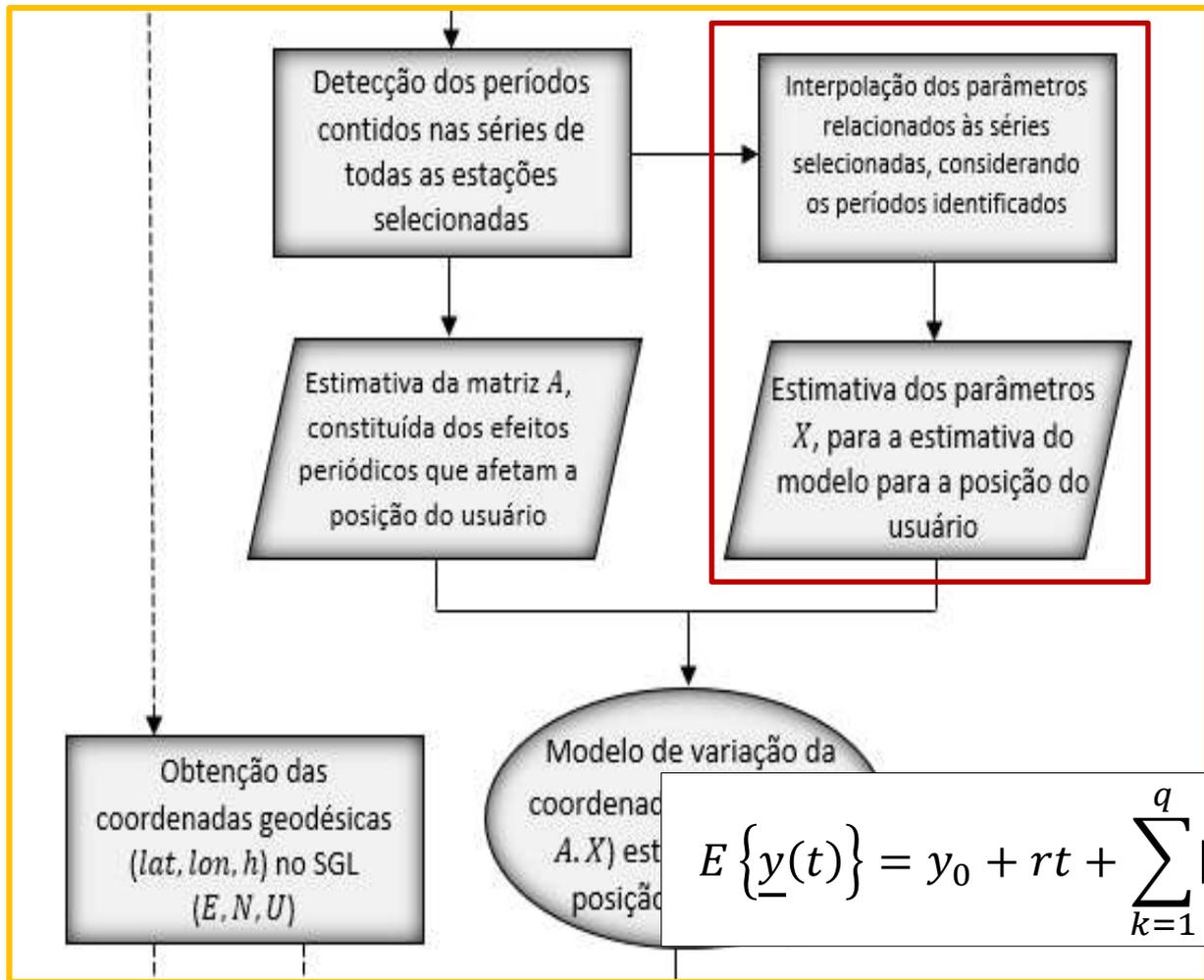






●	●	●	●
P_1	P_1	P_1	P_1
P_2	—	—	P_2
P_3	P_3	—	P_3
P_4	P_4	P_4	P_4
P_5	—	P_5	—
P_6	—	—	P_6
P_7	P_7	P_7	P_7
P_8	—	P_8	P_8
P_9	P_9	P_9	P_9
P_{10}	P_{10}	P_{10}	P_{10}
	P_{11}	P_{11}	—
	P_{12}		P_{12}

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \text{sen}(\omega_1 t_1) & \text{cos}(\omega_1 t_1) & \dots & \text{sen}(\omega_{10} t_1) & \text{cos}(\omega_{10} t_1) \\ 1 & t_2 & \text{sen}(\omega_1 t_2) & \text{cos}(\omega_1 t_2) & \dots & \text{sen}(\omega_{10} t_2) & \text{cos}(\omega_{10} t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_m & \text{sen}(\omega_1 t_m) & \text{cos}(\omega_1 t_m) & \dots & \text{sen}(\omega_{10} t_m) & \text{cos}(\omega_{10} t_m) \end{bmatrix}$$

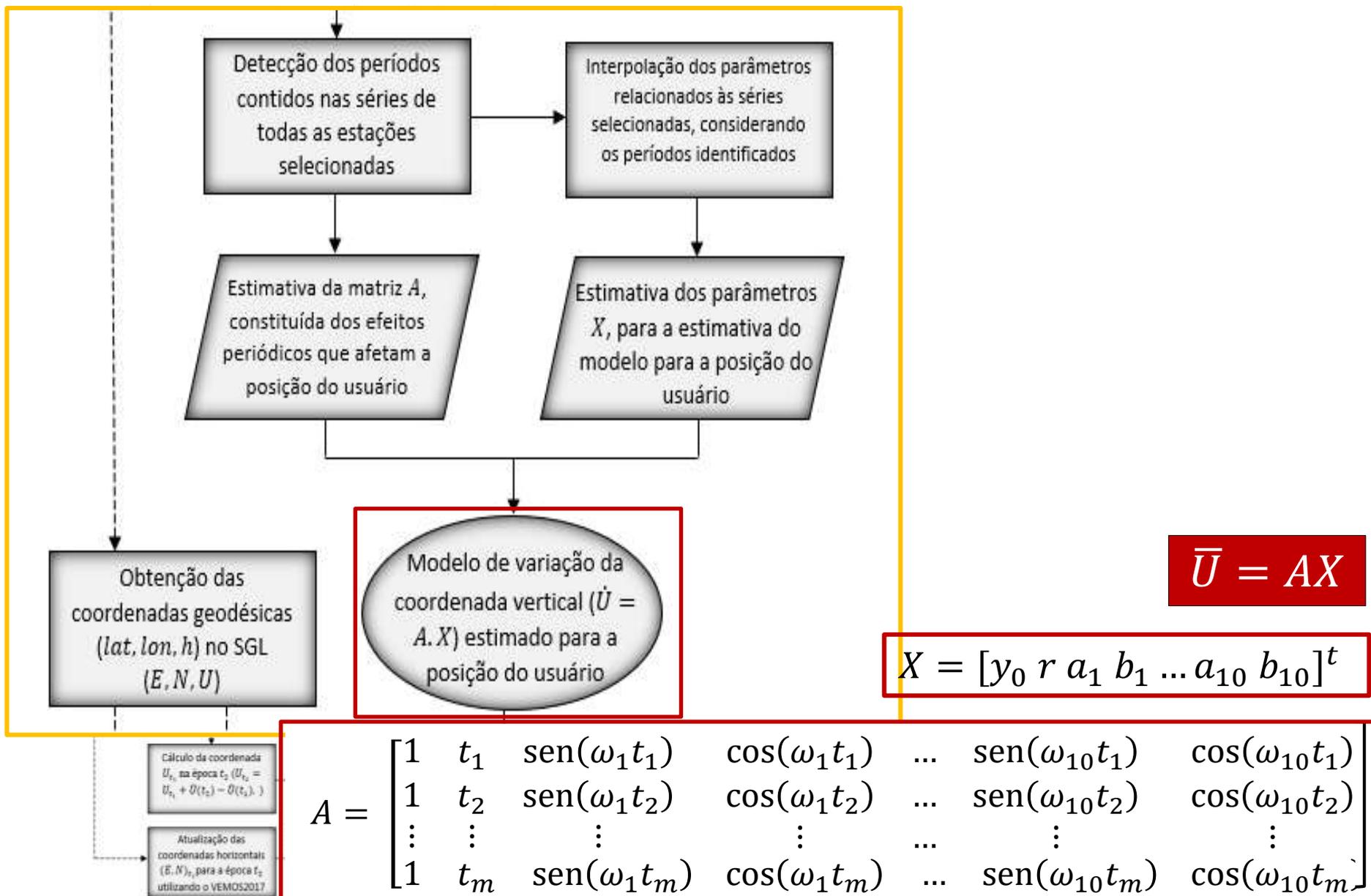


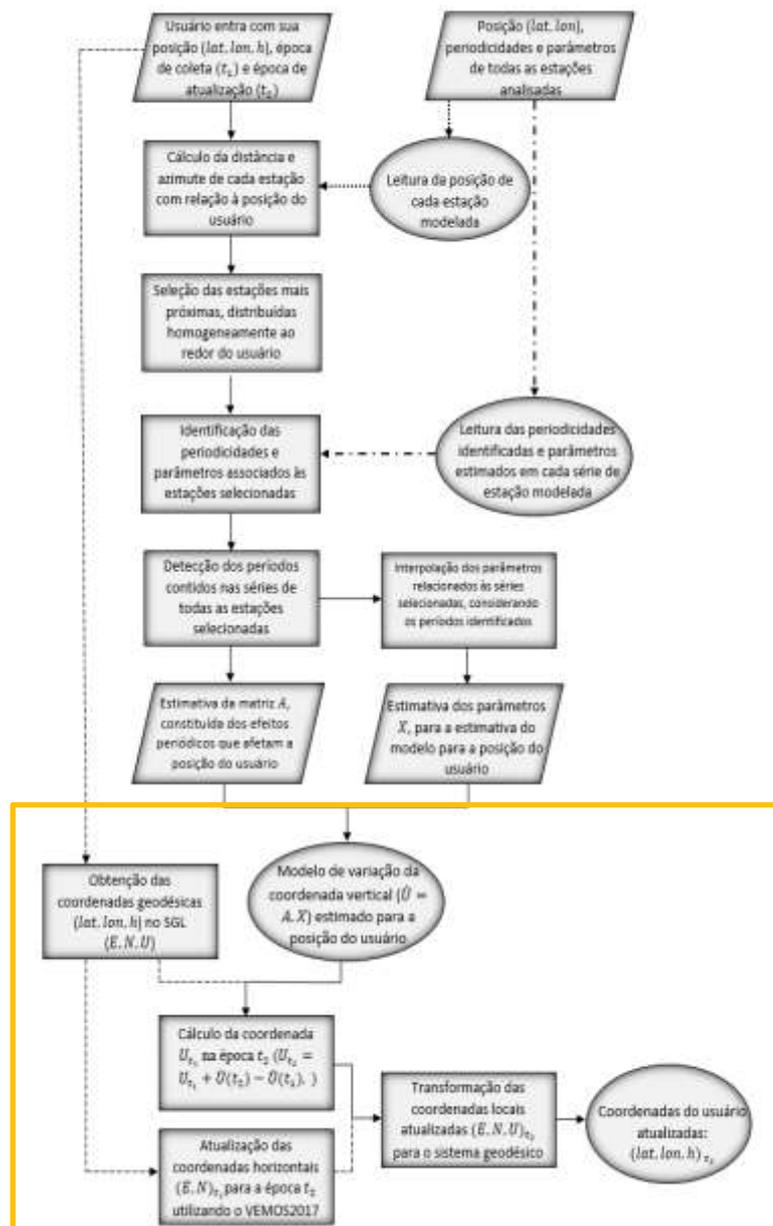
● P_1	● P_1	● P_1	● P_1
P_2	—	—	P_2
P_3	P_3	—	P_3
P_4	P_4	P_4	P_4
P_5	—	P_5	—
P_6	—	—	P_6
P_7	P_7	P_7	P_7
P_8	—	P_8	P_8
P_9	P_9	P_9	P_9
P_{10}	P_{10}	P_{10}	P_{10}
	P_{11}	P_{11}	—
	P_{12}		P_{12}

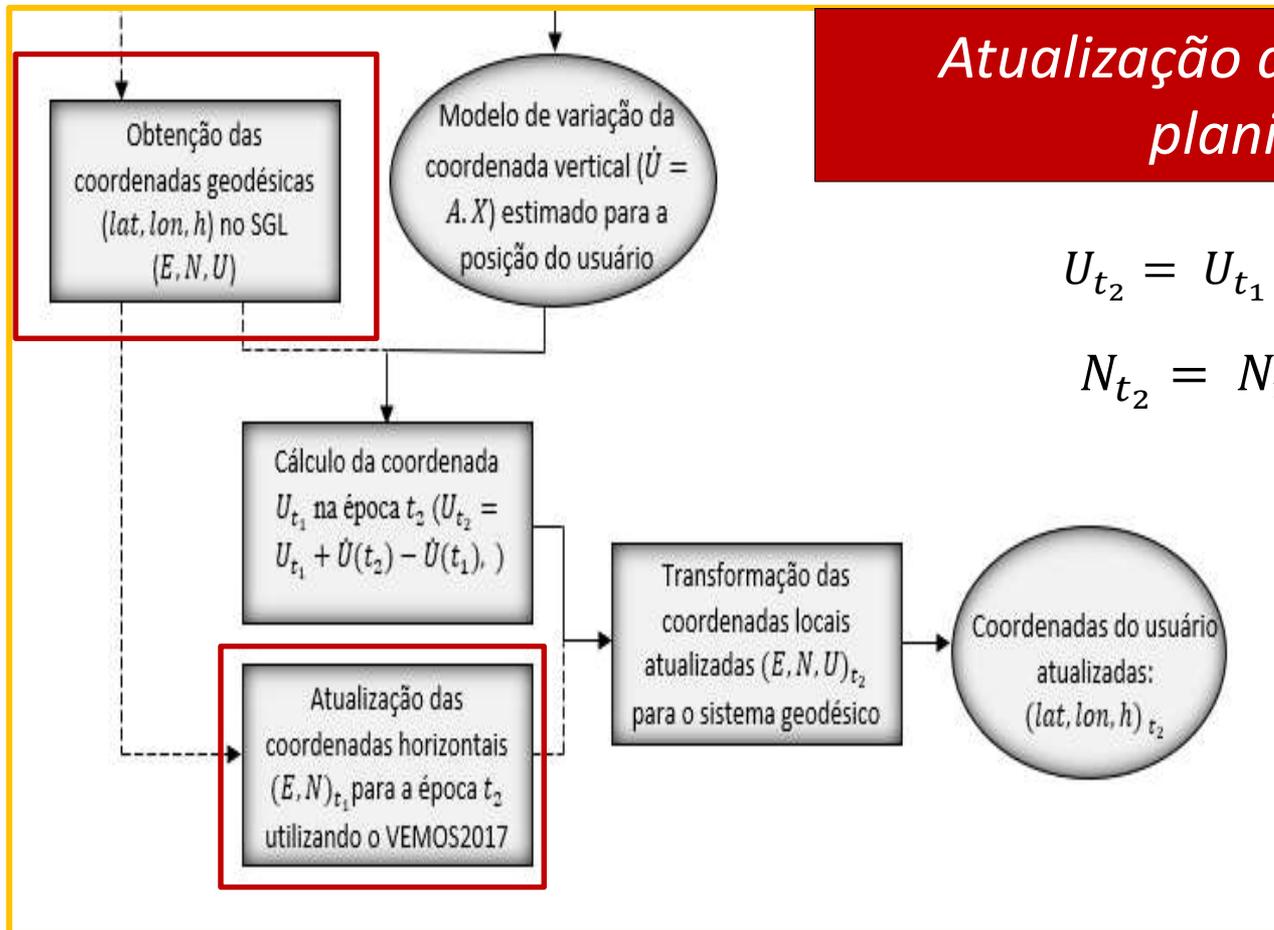
$$E \{ \underline{y}(t) \} = y_0 + rt + \sum_{k=1}^q [a_k \cos(\omega_k t) + b_k \text{sen}(\omega_k t)]$$

$$\bar{a}_1 = \frac{d_1 a_{11} + d_2 a_{12} + d_3 a_{13} + d_4 a_{14}}{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}$$

$$X = [y_0 \ r \ a_1 \ b_1 \ \dots \ a_{10} \ b_{10}]^t$$



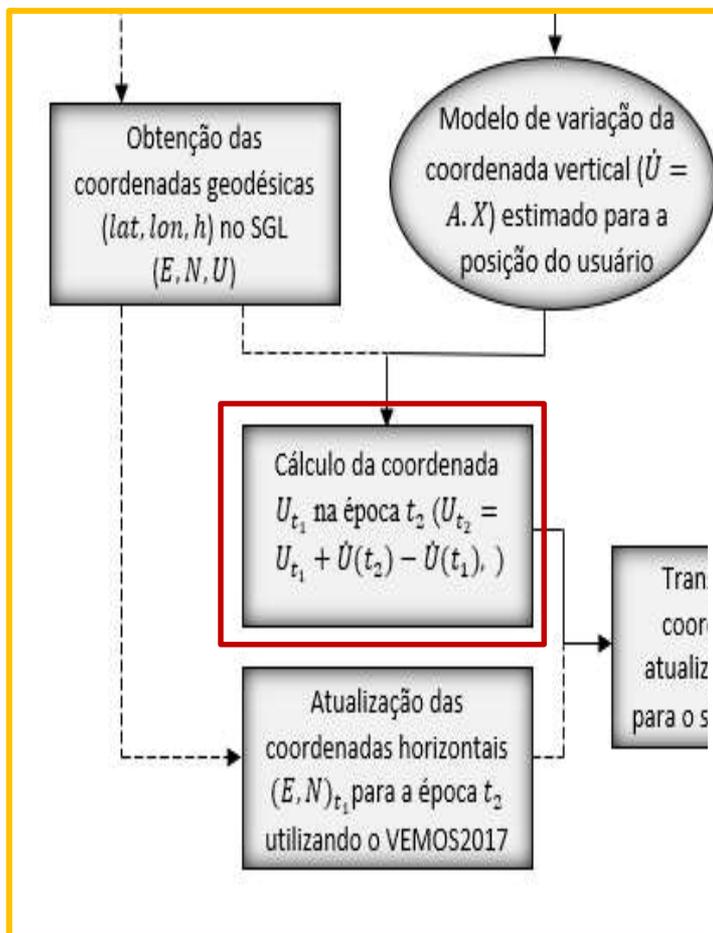




Atualização das componentes planimétricas

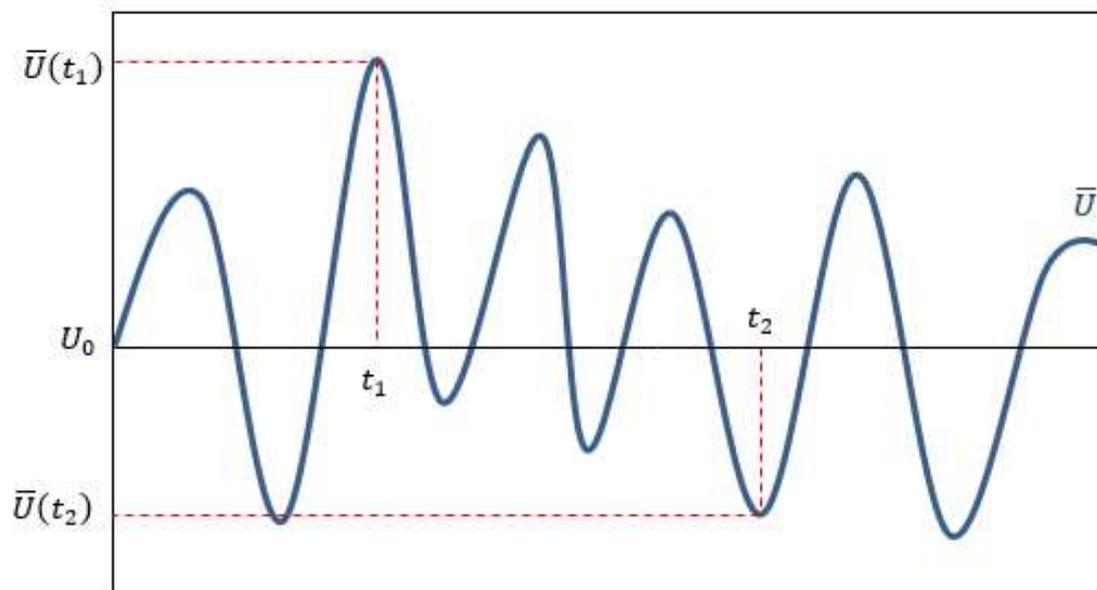
$$U_{t_2} = U_{t_1} - \bar{U}(t_1) + \bar{U}(t_2)$$

$$N_{t_2} = N_{t_1} + V_N(t_2 - t_1)$$



Atualização da componente altimétrica

$$U_{t_2} = U_{t_1} - \bar{U}(t_1) + \bar{U}(t_2)$$



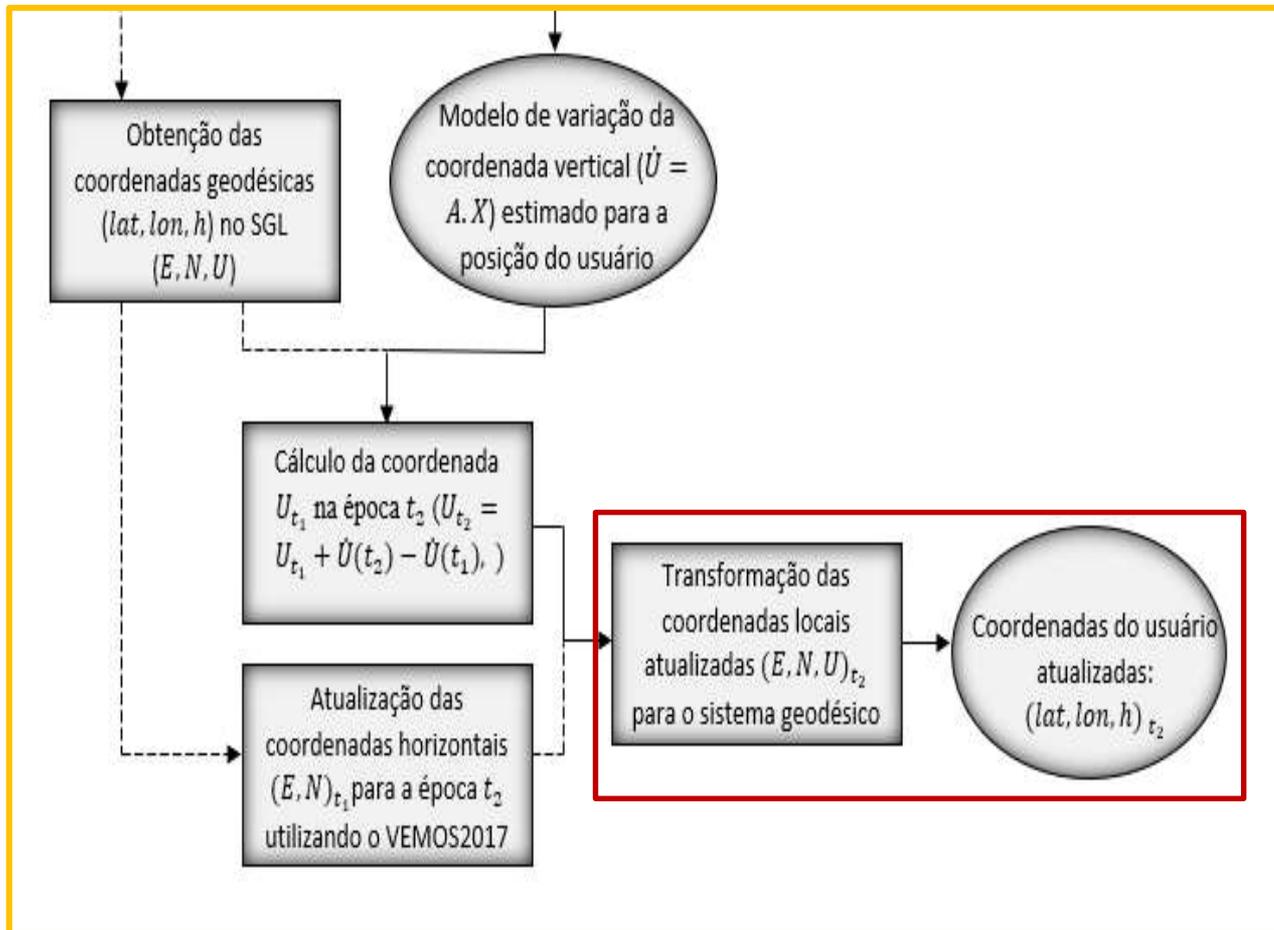
$$U_{t_1} = U_0 + \bar{U}(t_1)$$

$$U_{t_2} = U_0 + \bar{U}(t_2)$$



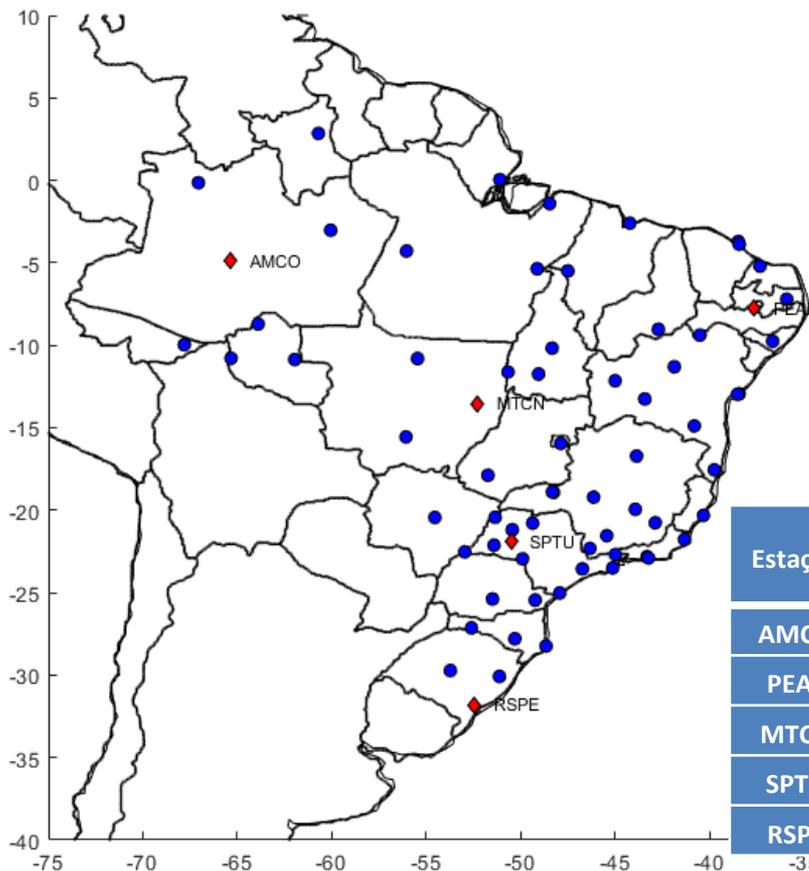
$$U_0 = U_{t_1} - \bar{U}(t_1)$$

$$U_0 = U_{t_2} - \bar{U}(t_2)$$



VALIDAÇÃO

Modelo de variação vertical para a posição de um usuário GNSS



Coordenadas obtidas pelo PPP-IBGE em SIRGAS2000, época 2020,1752 (05/03/2020)

Estação	Lat (gms)	σ Lat (m)	Lon (gms)	σ Lon (m)	Alt (m)	σ Alt (m)
AMCO	-4° 52' 19,1537	0,001	-65° 20' 02,3260	0,002	75,89	0,004
PEAF	-7° 45' 50,7949	0,001	-37° 37' 55,0408	0,002	533,03	0,003
MTCN	-13° 33' 20,9682	0,001	-52° 16' 16,8866	0,002	423,23	0,004
SPTU	-21° 55' 44,8158	0,001	-50° 29' 32,5331	0,002	508,78	0,003
RSPE	-31° 48' 08,8104	0,001	-52° 25' 03,4649	0,001	37,11	0,003

Distância (d) e azimute (az) das 65 estações GNSS analisadas com relação a posição dos pontos modelados

Estações	Pontos modelados									
	AMCO		PEAF		MTCN		SPTU		RSPE	
	d (Km)	az (graus)	d (Km)	az (graus)	d (Km)	az (graus)	d (km)	az (graus)	d (km)	az (graus)
ALAR	3177,3	101,4	244,5	154,1	1748,3	77,7	1992,7	49,6	2907,8	3177,3
BABR	2364,2	111,2	940,9	238,2	804,5	79,6	1228,1	29,1	2292,9	2364,2
BAIR	2662,2	106,9	607,0	229,3	1157,6	78,7	1489,3	39,2	2499,4	2662,2
BATF	3089,5	118,9	1105,8	191,7	1411,5	109,9	1224,0	68,5	2021,5	3089,5
BAVC	2880,8	114,3	860,1	203,3	1244,5	98,2	1283,8	54,2	2203,3	2880,8
BELE	1906,6	78,9	1389,0	300,0	1404,6	17,6	2268,6	5,8	3349,6	1906,6
BOAV	995,8	31,0	2795,0	293,9	2030,1	332,4	2930,7	336,8	3870,7	995,8
BOMJ	2561,3	112,7	877,0	225,5	958,1	89,0	1216,2	39,0	2238,6	2561,3
BRAZ	2255,6	124,2	1433,6	230,8	541,9	119,9	716,8	22,9	1809,3	2255,6
BRFT	2961,3	89,0	438,6	348,5	1853,9	56,0	2370,9	34,7	3378,9	2961,3
CEEU	2961,3	89,0	438,6	348,5	1853,9	56,0	2370,9	34,7	3378,9	2961,3
CEFE	3167,7	124,6	1415,2	191,4	1472,2	122,2	1070,5	82,2	1748,6	3167,7
CEFT	2957,3	88,6	457,7	348,3	1860,4	55,4	2383,5	34,3	3393,1	2957,3
CHPI	2919,8	134,1	1823,2	204,5	1268,6	143,9	573,4	99,5	1247,0	2919,8
CUIB	1552,9	140,2	2174,9	245,0	465,2	241,0	917,5	319,4	1830,9	1552,9
GOJA	2056,6	135,4	1887,1	232,2	482,3	173,2	466,1	343,8	1539,8	2056,6
ILHA	2280,0	140,1	2027,3	224,9	766,5	172,8	188,3	332,0	1262,7	2280,0
IMBT	3098,5	147,7	2528,3	205,6	1663,2	167,7	722,3	165,6	536,5	3098,5
IMPZ	1970,7	92,8	1118							

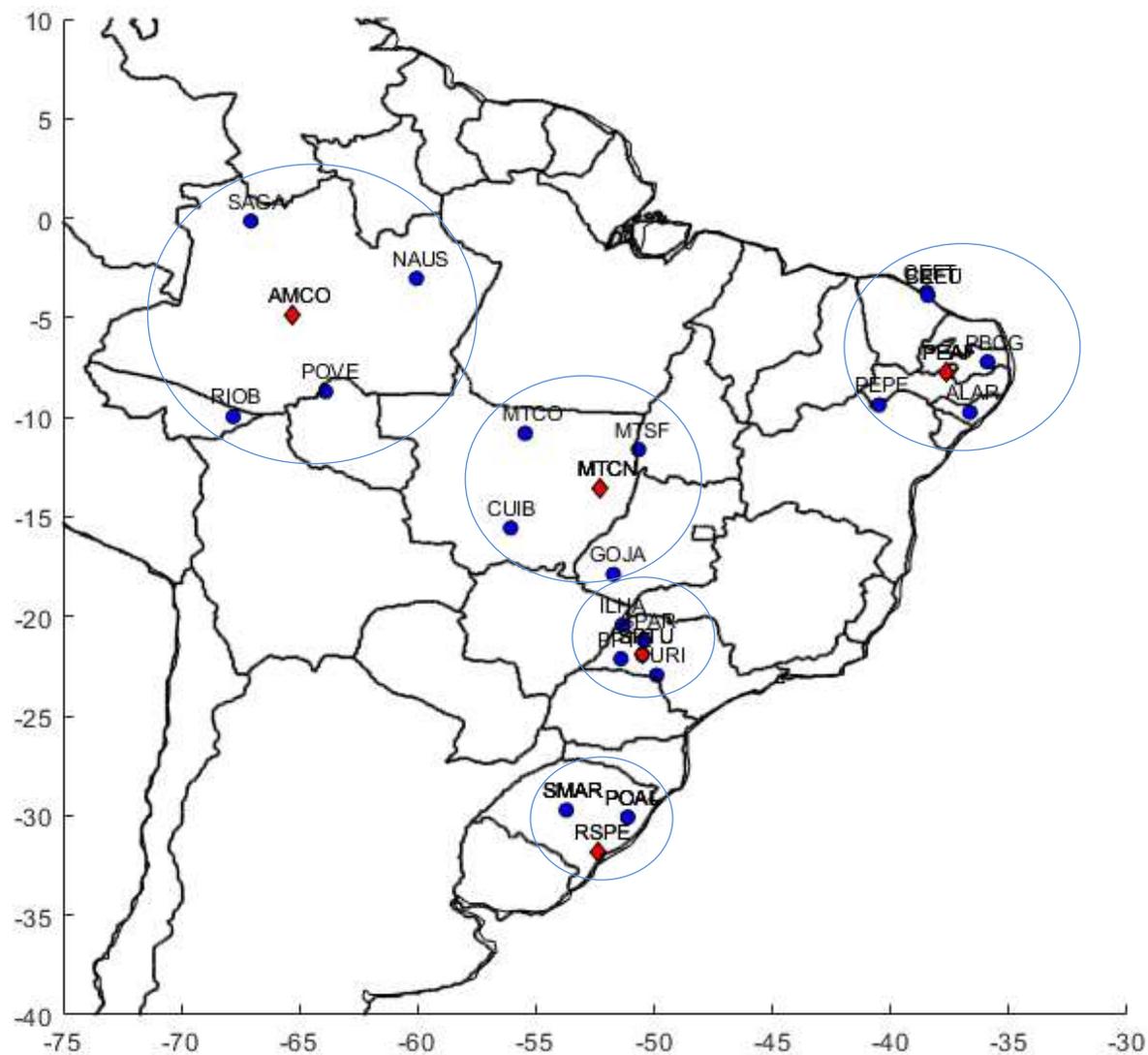
Cont.

Estações	Pontos modelados									
	AMCO		PEAF		MTCN		SPTU		RSPE	
	<i>d</i> (Km)	<i>az</i> (graus)								
MABA	1792,4	92,5	1295,9	281,2	969,0	21,0	1832,6	4,8	2920,7	1792,4
MAPA	1669,0	71,3	1720,8	299,6	1506,4	5,0	2417,2	358,4	3482,5	1669,0
MGBH	2832,9	127,7	1505,3	206,0	1134,5	129,8	717,3	73,2	1560,3	2832,9
MGIN	2790,9	135,3	1854,3	209,0	1154,4	148,0	431,8	96,5	1209,7	2790,9
MGMC	2665,2	121,0	1197,8	213,6	968,5	112,3	904,0	51,4	1874,9	2665,2
MGRP	2600,9	129,1	1560,6	214,9	905,5	134,7	545,1	57,1	1527,0	2600,9
MGUB	2405,5	131,6	1681,3	221,7	732,0	144,8	406,8	35,2	1483,7	2405,5
MGV1	2807,8	132,6	1734,5	207,8	1141,8	141,8	524,8	86,2	1329,2	2807,8
MSCG	2072,1	147,0	2286,4	230,5	798,9	197,2	451,4	290,8	1274,4	2072,1
MTCO	1269,1	121,8	1978,7	258,8	461,2	311,1	1337,7	336,1	2332,8	1269,1
MTSF	1773,6	113,9	1488,6	252,3	276,4	39,2	1139,7	359,1	2230,6	1773,6
NAUS	620,6	70,8	2522,4	280,8	1442,7	323,2	2320,3	332,5	3248,1	620,6
NEIA	2878,7	142,1	2190,1	208,5	1346,0	161,0	431,2	143,2	870,1	2878,7
ONRJ	3072,3	132,3	1772,4	198,9	1404,8	138,7	755,4	99,6	1338,5	3072,3
OURI	2581,4	141,9	2121,9	216,5	1068,4	166,8	128,6	151,7	1011,1	2581,4
PAIT	1032,6	86,8	2064,0	279,7	1104,0	337,8	2032,8	342,3	3039,4	1032,6
PBCG	3231,9	96,1	199,9	72,3	1916,2	70,1	2247,6	45,9	3182,7	3231,9
PEPE	2764,6	101,8	363,6	240,1	1361,2	71,4	1746,0	39,0	2748,4	2764,6
PISR	2525,3	101,7	575,6	255,5	1156,6	65,3	1648,4	31,3	2693,4	2525,3
POAL	3131,6	153,6	2819,5	207,8	1826,7	176,5	903,8	183,8	228,2	3131,6
POLI	2850,0	138,0	1991,4	207,9	1249,5	153,1	426,3	115,8	1070,7	2850,0
POVE	453,1	159,7	2870,5	266,0	1375,3	291,8	2040,6	313,7	2796,1	453,1
PPTE	2413,1	143,3								

Cont.

Estações	Pontos modelados									
	AMCO		PEAF		MTCN		SPTU		RSPE	
	<i>d</i>	<i>az</i>	<i>d</i>	<i>az</i>	<i>d</i>	<i>az</i>	<i>d</i>	<i>az</i>	<i>d</i>	<i>az</i>
	(Km)	(graus)	(Km)	(graus)	(Km)	(graus)	(km)	(graus)	(km)	(graus)
PRGU	2688,6	148,5	2427,9	215,2	1309,8	176,6	395,9	194,6	716,8	2688,6
RIOB	625,5	205,5	3289,1	263,5	1733,0	281,6	2261,8	303,0	2866,9	625,5
RIOD	3060,8	132,2	1767,4	199,3	1392,9	138,7	746,1	99,0	1339,6	3060,8
RJCG	3159,8	128,2	1595,0	193,9	1470,1	129,8	946,7	90,6	1560,4	3159,8
RNMO	3075,3	91,9	285,1	6,8	1875,5	61,9	2318,9	39,2	3300,4	3075,3
ROGM	653,6	180,0	3031,4	261,5	1450,6	280,8	1997,7	305,7	2660,1	653,6
ROJI	759,5	151,1	2673,9	260,8	1094,1	284,8	1725,0	313,4	2501,4	759,5
ROSA	2351,0	147,0	2302,4	223,3	994,2	184,0	262,0	254,9	1028,5	2351,0
SAGA	556,7	339,9	3333,3	283,2	2193,2	311,3	2978,8	321,3	3770,5	556,7
SALU	2346,1	84,6	926,0	307,9	1498,7	36,7	2232,9	18,4	3307,1	2346,1
SAVO	3057,2	108,7	578,9	188,6	1497,8	89,0	1616,4	53,9	2514,8	3057,2
SCCH	2788,0	152,7	2644,2	214,4	1500,7	181,2	614,9	199,8	517,3	2788,0
SCLA	2967,5	149,7	2570,0	209,3	1585,5	173,0	649,6	178,4	489,1	2967,5
SJRP	2451,2	137,1	1908,3	219,8	857,3	159,4	172,7	42,9	1256,0	2451,2
SMAR	2981,6	157,5	2929,0	212,4	1790,0	184,5	920,7	199,7	262,3	2981,6
SPAR	2403,4	139,8	2016,6	221,3	865,8	167,4	82,6	3,8	1191,0	2403,4
SSA1	3049,6	108,8	584,3	189,4	1488,4	89,1	1606,9	53,8	2506,8	3049,6
TOGU	1939,7	114,1	1325,3	249,6	403,2	60,4	1135,8	7,9	2236,0	1939,7
TOPL	1957,5	108,4	1204,4	256,4	569,5	49,1	1319,2	10,3	2417,1	1957,5
UBA1	2965,4	135,7	1909,0	203,7	1331,7	146,8	578,6	108,6	1166,0	2965,4
UBE1	2398,5	131,6	1683,4	221,9	725,6	145,1	405,9	34,2	1485,2	2398,5
UFPR	2829,2	144,8	2299,8	210,7	1352,0	166,9	410,4	162,1	769,6	2829,2
VICO	2970,9	128,1								

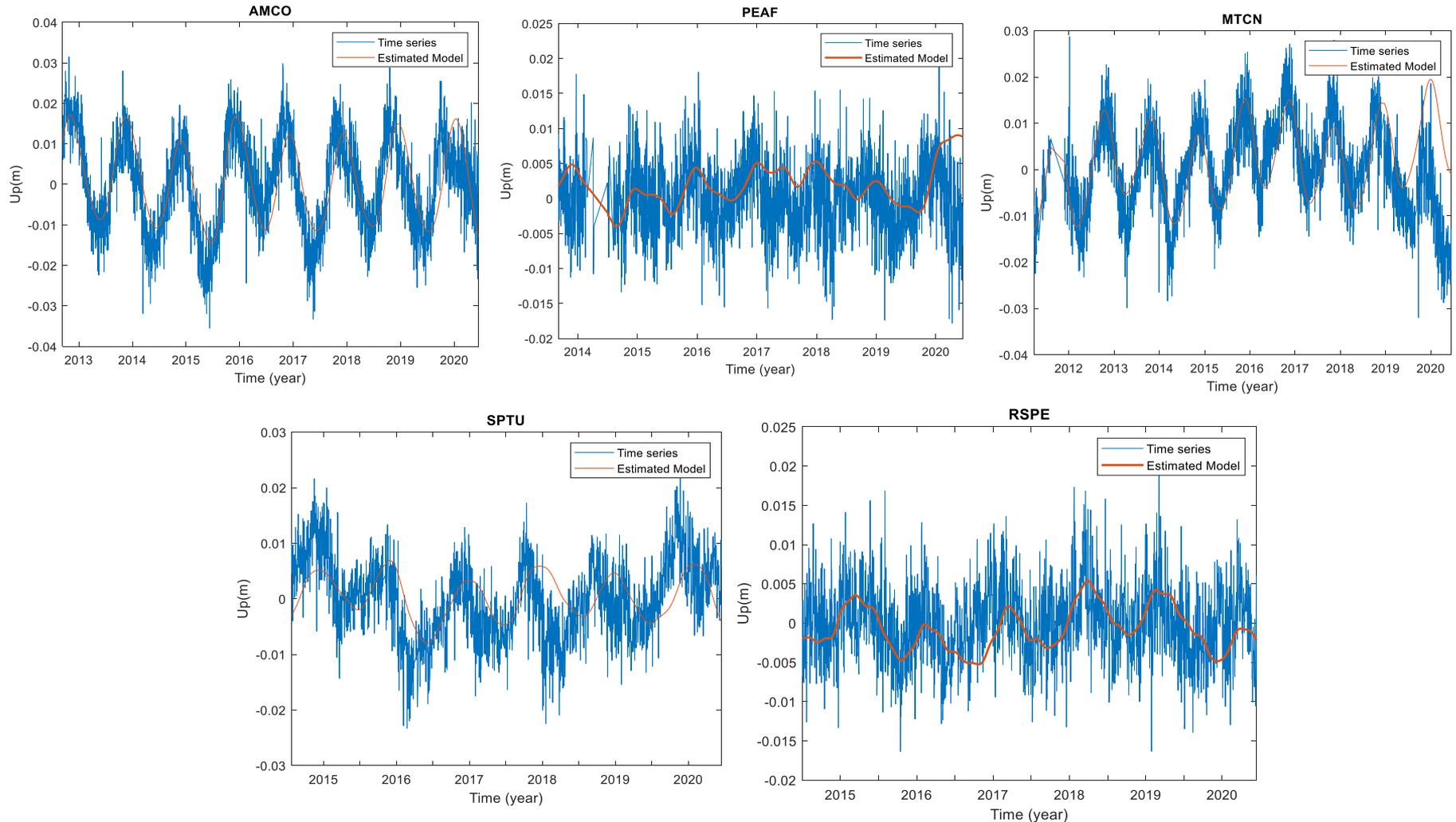
Estações utilizadas na modelagem de cada ponto



Períodos de efeitos cíclicos considerados na estimativa do modelo de variação vertical para a posição de cada ponto

	Pontos modelados				
	AMCO	PEAF	MTCN	SPTU	RSPE
Períodos considerados na modelagem de cada ponto	-	-	-	-	0,1280
	-	-	-	-	0,1522
	-	-	-	-	0,1810
	-	0,2153	-	-	0,2153
	-	0,2560	-	-	0,2560
	-	0,3044	-	0,3044	0,3044
	-	0,3620	-	0,3620	0,3620
	0,4305	0,4305	0,4305	-	0,4305
	0,5120	0,5120	0,5120	0,5120	0,5120
	0,6089	0,6089	0,6089	0,6089	0,6089
	0,7240	0,7240	0,7240	0,7240	0,7240
	0,8610	0,8610	0,8610	0,8610	0,8610
	1,0240	1,0240	1,0240	1,0240	1,0240
	1,2177	1,2177	1,2177	1,2177	1,2177
	1,4481	1,4481	1,4481	1,4481	1,4481
	1,7221	1,7221	1,7221	1,7221	1,7221
	2,0479	-	2,0479	2,0479	2,0479
	2,4354	2,4354	2,4354	2,4354	2,4354
	2,8962	2,8962	2,8962	2,8962	2,8962
	3,4442	3,4442	3,4442	3,4442	3,4442
4,0958					
-					

Modelo de variação vertical estimado X série temporal de coordenada vertical para cada estação



Análise da qualidade dos modelos estimados

Estação	Média das discrepâncias (m)	Desvio-padrão das discrepâncias (m)	RMSE (m)
AMCO	-0.0012	0.0080	0.0080
PEAF	-0.0020	0.0057	0.0060
MTCN	-0.0018	0.0085	0.0087
SPTU	-0.0005	0.0068	0.0068
RSPE	0.0007	0.0049	0.0049

Discrepâncias em relação as coordenadas oficiais em SIRGAS2000, época 2000,4

Estação	Δ_{lat} (m)	Δ_{lon} (m)	Δ_{alt} (m)
AMCO	-0,001	0,002	0,0118
PEAF	-0,001	0,001	-0,0001
MTCN	0,001	0,001	0,0058
SPTU	-0,001	-0,002	-0,0076
RSPE	0,001	0,001	0,0258

CONCLUSÕES

- Nesta pesquisa foi proposta uma nova metodologia para a atualização da componente altimétrica, com estudo de caso para o SGB, baseada na análise de séries temporais da componente altimétrica;
- Para validar a metodologia proposta, foi realizado um experimento cujo objetivo era estimar os modelos de variação vertical de cinco pontos distribuídos em diferentes regiões do Brasil e, por meio deles, atualizar a componente altimétrica da época de coleta de dados (2020,1752) para a época 2000,4;
- A qualidade das estimativas foi avaliada por meio das discrepâncias das coordenadas atualizadas com relação às coordenadas oficiais dos pontos na época de referência, ficando na ordem milimétrica para as coordenadas planimétricas e variando de menos de 1 mm até -2,5 cm para a componente altimétrica;

CONCLUSÕES

- A validação dos modelos estimados foi realizada por meio da comparação desses modelos com as séries de coordenada vertical das estações em questão. Os resultados mostraram que os modelos estimados, de modo geral, descrevem bem a variação da componente vertical da estação, sendo a acurácia obtida para os modelos em torno de 7 mm, na média;
- Conclui-se, portanto, que a metodologia proposta é promissora, embora algumas investigações e melhorias ainda devem ser realizadas;

OBRIGADA PELA ATENÇÃO!!!
Muchas gracias por su atención!!!

AGRADECIMENTOS:

