

Processamento de linhas de bases curtas pelo método relativo utilizando efemérides transmitidas e precisas

Lorena Araújo Silva¹
Maria Lígia Chuerubim¹
Stephanie Cristina Matos Pereira¹
Josildo de Azevedo¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU/FECIV
Caixa Postal 593 – 38408-100 - Uberlândia - MG, Brasil
araujolorena.s@gmail.com
marialigia@feciv.ufu.br
stephaniecristina25@hotmail.com
josildo@ufu.br

Abstract. In high precision positioning, it's necessary that systematic errors inherent in several spatial positioning system, as the Global Navigation Satellite System, be minimized or even eliminated. Among them, stands out orbital errors, which occurs because of the variations in the reference: while the satellites' coordinates are determined in relation to a fixed reference system (inertial), the coordinates of the stations located on the earth surface are subject to variations caused by the rotation of the Earth. Thus, errors present in the satellite coordinates are propagated directly to the users' position. This fact can be noticed by the processing and adjustment of Global Positioning System datas, analyzing the variations caused by the choice of using either satellites' orbits pos-processed (precise ephemeris) or orbits transmitted in real time (broadcast ephemeris). In order to study these discrepancies, 13 stations of the local GNSS lan, located in Federal University of Uberlândia, Santa Mônica campus, were surveyed with GPS receivers of single frequency (L1), considering MGUB (Uberlândia, MG), station belonging to the Brazilian network for continuous monitoring, as the base, referenced to SIRGAS2000 (epoch 2000,4). Two strategies have been adopted in the datas processing: one applying broadcast ephemeris and other accurate ephemeris of the Internacional GNSS Service. It was verified that the variations between the results obtained with broadcast and accurate ephemeris are in the milimeter order for the vertical component, and in the centimetric order for horizontal components. These results match with the values found in the literature and with the INCRA Technical Standard.

Palavras-chave: spatial positioning, precision survey, datas processing, geodesy, posicionamento espacial, levantamento de precisão, processamento de dados, geodésia.

1. Introdução

As técnicas de posicionamento por satélites artificiais como o *Global Positioning System* (GPS) vêm contribuindo com o desenvolvimento de inúmeras pesquisas e atividades da sociedade civil, dentre as quais se destaca o georreferenciamento de pontos localizados na superfície terrestre e vinculados a referenciais geodésicos previamente definidos e realizados, como o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) e o *International Terrestrial Reference System* (ITRS). Estes referenciais possibilitam a determinação precisa das coordenadas das estações e respectivas velocidades em uma época específica, uma vez que consideram o efeito da componente temporal nas componentes das estações.

Em 2005, foi adotado como referencial geodésico oficial no Brasil o SIRGAS2000 (época 2000,4), que corresponde a densificação do *International Terrestrial Reference Frame* 2000 (ITRF2000) nas Américas, apresentando nível de acurácia da ordem centimétrica. A partir desta data, todos os trabalhos realizados em território nacional devem estar vinculados ao SIRGAS2000, que é materializado por um conjunto de estações distribuídas ao longo do continente americano, das quais fazem parte a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) administrada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Com base nas técnicas de posicionamento espaciais disponíveis atualmente deve-se, também, escolher adequadamente o método de levantamento a partir do qual as coordenadas

tridimensionais dos pontos serão determinadas. No método de posicionamento absoluto, as coordenadas das estações são determinadas diretamente em relação ao centro de massa da Terra, enquanto que no posicionamento relativo, as coordenadas de um ponto são determinadas em relação a um ou mais pontos de coordenadas conhecidas, fornecendo deste modo maior precisão.

Para tanto, deve-se atentar-se ao nível de precisão requerida em cada aplicação que pode variar de poucos milímetros a centímetros. Desta forma, devem ser considerados critérios como método de posicionamento utilizado, duração de rastreamento, comprimento da linha de base, dentre outros, bem como os principais erros envolvidos no posicionamento por satélites como a ionosfera, a troposfera, as perdas de ciclo, os erros orbitais, etc.

No que se refere aos erros orbitais, podemos corrigi-los com base nas informações de órbitas dos satélites, denominadas efemérides. As efemérides transmitidas do sistema GPS estão referenciadas ao *World Geodetic System* – 1984 (WGS84), na semana G1150, enquanto que as efemérides precisas estão referenciadas ao IGS2005 (IGS05), referencial compatível ao ITRF, realização 2005, apresentando diferenças de poucos milímetros.

As órbitas transmitidas são obtidas durante o rastreamento dos pontos juntamente com o arquivo de observação, que posteriormente são convertidos do formato nativo para o formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), obtendo-se os arquivos de extensão “.o” e “.n”, que correspondem, respectivamente, aos arquivos de observação e navegação.

O formato das órbitas precisas, por sua vez, é composto pelos registros da posição do satélite dado em coordenadas cartesianas, em quilômetros e referenciadas ao ITRS, bem como pelas correções do relógio dos satélites em microssegundos, apresentando um formato (opcional) que contém os registros de velocidade e taxa de variação do relógio, em épocas equidistantes (MONICO, 2008). Nestes arquivos o sistema de tempo é referenciado em hora GPS, mesmo quando apresentado em dia Gregoriano ou Juliano Modificado (SPOFFORD e REMONDI, 1997).

A combinação entre as órbitas obtidas pelos centros de análise do IGS nos fornecem três tipos de órbitas precisas (MONICO, 2008):

- IGU: órbita IGS ultrarrápida, composta por duas componentes, uma predita e a outra observada. Apresenta latência que varia de 3 a 9 horas, sendo disponibilizadas 4 vezes por dia.
- IGR: órbita IGS rápida, com latência que varia entre 17 a 41 horas.
- IGS: órbita IGS final, resultante da combinação de órbitas entre os diferentes centros de análise do IGS, sendo disponibilizadas de 12 a 18 dias após a coleta dos dados.

Segundo Seeber (2003), as efemérides precisas são provenientes de estimativas feitas pelo IGS a partir de elementos orbitais observados e, portanto, sua acurácia é da ordem de poucos centímetros, enquanto que a das efemérides transmitidas varia de 1,5 metros a 2 metros. Por esta razão, as efemérides precisas têm sido aplicadas em processamentos envolvendo linhas de bases longas e em aplicações que requerem alta precisão, como em estudos de monitoramento geodinâmico, controle de estruturas, dentre outros (MONICO, 2008).

O nome do arquivo que contém as órbitas precisas é identificado pela sigla do órgão que o produz, pela semana GPS e pelo dia da semana GPS, que se inicia ao domingo (0) e termina no sábado (6). A extensão destes arquivos é dada em “.sp3”, que corresponde a sigla *Standard Product 3* (SPOFFORD e REMONDI, 1997).

O presente trabalho tem por objetivo analisar as discrepâncias entre as coordenadas das estações da Rede GNSS local da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Santa Mônica, rastreadas com receptores GPS de simples frequência (L1), resultantes do processamento de dados utilizando-se órbitas precisas e transmitidas para linhas de bases curtas, bem como das precisões e acurácia obtidas no posicionamento relativo.

2. Metodologia de Trabalho

Para o presente trabalho foram utilizados dados GNSS, pertencentes à RBMC, no formato RINEX da estação MGUB (Uberlândia), disponíveis no endereço <http://www.ibge.gov.br/home/download/geociencias.shtm>, para os dias GPS 194, 195, 221 e 247. As coordenadas homologadas da estação MGUB em SIRGAS2000, bem como suas precisões, em metros, encontram-se disponibilizadas no endereço ftp://geoftp.ibge.gov.br/RBMC/relatorio/Descritivo_MGUB.pdf e são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Coordenadas geodésicas da estação MGUB em SIRGAS2000 (época 2000,4).

Fonte: IBGE.

Latitude (ϕ)	-18°55'08,9880"	$\sigma_{\phi} = 0,001 \text{ m}$
Longitude (λ)	-48°15'21,7777"	$\sigma_{\lambda} = 0,001 \text{ m}$
Altitude Geométrica (h)	869,24 m	$\sigma_h = 0,004 \text{ m}$

Foram utilizados, ainda, dados GPS coletados por meio do rastreamento de 13 estações passivas (FECIV1, CIV1, CIV2, CIV3, FECIV3, FECIV4, FECIV5, FECIV6, FECIV8, FECIV10, FECIV13, FECIV2 e CIV4) pertencentes à rede GNSS local da UFU, campus Santa Mônica, obtidos com receptores de simples frequência (L1).

Os arquivos de efemérides transmitidas foram coletados juntamente com os arquivos de observação na etapa de rastreamento das estações, enquanto que as efemérides precisas foram obtidas junto ao site oficial do IGS (<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/>). Os aplicativos computacionais utilizados no processamento e ajustamento dos dados GNSS foi o *software* Topcon Tools versão 8.2 e para a transformação entre coordenadas geodésicas em locais o *software* Matlab.

As estações da rede GNSS da UFU foram rastreadas com receptores Promark2 (L1) equipados com antenas ASHTECH110454, adotando-se como altura padrão 2 metros, para minimizar o efeito do multicaminho na estação. Aplicou-se o método de posicionamento relativo estático com uma duração mínima de 30 minutos e com taxa de coleta de 15 segundos. Os pontos foram coletados em 4 campanhas distintas realizadas nos seguintes dias GPS: dia 194 (FECIV1, FECIV3, FECIV4, CIV5, FECIV6 e FECIV8), dia 195 (CIV1, CIV2 e CIV3), dia 221 (FECIV13 e FECIV10) e dia 247 (FECIV2 e CIV4).

Posteriormente, os dados GPS foram processados e ajustados de forma relativa no *software* Topcon Tools, injuncionando-se a estação MGUB em duas fases distintas: utilizando as efemérides transmitidas e as efemérides precisas. Após o processamento e ajustamento dos dados GPS obteve-se as coordenadas das estações, com suas respectivas precisões.

Para garantir melhor exatidão na análise, dos resultados obtidos as coordenadas geodésicas das estações foram convertidas para o Sistema Geodésico Local (SGL) adotando-se a formulação matemática de Soler e Hothem (1988) e como origem a MGUB, por meio de um *script* implementado no *software* Matlab.

3. Resultados e Discussão

A estação utilizada como base (MGUB) encontra-se próxima de todos os pontos cujas coordenadas foram estimadas. Logo, já era esperado que os processamentos utilizando efemérides precisas e transmitidas resultassem em coordenadas com discrepâncias pequenas. Vale ressaltar que os rastreios não foram feitos simultaneamente, logo há sobre as variáveis os efeitos relativos à propagação do sinal e ao multicaminho local, que variam diariamente.

A Tabela 2 apresenta as coordenadas geodésicas determinadas com órbitas precisas e a Tabela 3 as coordenadas das estações estimadas com órbitas transmitidas.

Tabela 2. Coordenadas Geodésicas e respectivas precisões obtidas com efemérides precisas.

Estação	Longitude (λ)	σ_λ (m)	Latitude (ϕ)	σ_ϕ (m)	Alt. Geométrica (h)	σ_h (m)	Distância (m)
FECIV1	-48°15'26,11362"	0,005	-18°55'07,95384"	0,004	859,051	0,013	131,215
CIV1	-48°15'18,93917"	0,006	-18°55'04,82945"	0,006	862,087	0,013	152,663
CIV2	-48°15'18,32330"	0,008	-18°55'07,44448"	0,006	864,638	0,021	111,779
CIV3	-48°15'20,33849"	0,007	-18°55'07,62079"	0,009	861,873	0,018	59,967
FECIV3	-48°15'22,73610"	0,005	-18°55'02,78457"	0,005	858,584	0,012	193,111
FECIV4	-48°15'19,56965"	0,003	-18°55'02,07596"	0,003	862,467	0,001	222,34
FECIV5	-48°15'22,30832"	0,004	-18°55'05,69054"	0,006	859,957	0,013	103,004
FECIV6	-48°15'22,82866"	0,001	-18°55'02,55459"	0,001	858,339	0,005	200,511
FECIV8	-48°15'22,23196"	0,005	-18°55'07,63344"	0,006	860,706	0,013	44,55
FECIV10	-48°15'31,27478"	0,002	-18°55'08,96677"	0,002	855,56	0,004	278,277
FECIV13	-48°15'29,86662"	0,003	-18°55'11,65786"	0,003	857,251	0,005	250,848
FECIV2	-48°15'27,01188"	0,002	-18°55'03,45445"	0,002	856,013	0,005	229,339
CIV4	-48°15'18,93882"	0,002	-18°55'04,82948"	0,002	862,096	0,005	152,668

Tabela 3. Coordenadas Geodésicas e respectivas precisões obtidas com efemérides transmitidas.

Estação	Longitude (λ)	σ_λ (m)	Latitude (ϕ)	σ_ϕ (m)	Alt. Geométrica (h)	σ_h (m)	Distância (m)
FECIV1	-48°15'26,11361"	0,005	-18°55'07,95384"	0,005	859,051	0,013	131,215
CIV1	-48°15'18,93911"	0,012	-18°55'04,82933"	0,015	862,093	0,013	152,667
CIV2	-48°15'18,32330"	0,008	-18°55'07,44448"	0,006	864,638	0,021	111,779
CIV3	-48°15'20,33849"	0,007	-18°55'07,62079"	0,009	861,873	0,018	59,967
FECIV3	-48°15'22,73610"	0,005	-18°55'02,78458"	0,005	858,584	0,013	193,111
FECIV4	-48°15'19,56969"	0,003	-18°55'02,07587"	0,003	860,414	0,01	222,34
FECIV5	-48°15'22,30832"	0,004	-18°55'05,69054"	0,006	859,957	0,013	103,004
FECIV6	-48°15'22,82866"	0,002	-18°55'02,55460"	0,002	858,338	0,005	200,511
FECIV8	-48°15'22,23196"	0,005	-18°55'07,63344"	0,005	860,706	0,012	44,55
FECIV10	-48°15'31,27478"	0,002	-18°55'08,96676"	0,002	855,561	0,006	278,277
FECIV13	-48°15'29,86662"	0,003	-18°55'11,65785"	0,003	857,252	0,006	250,848
FECIV2	-48°15'27,01188"	0,002	-18°55'03,45445"	0,002	856,013	0,005	229,339
CIV4	-48°15'18,93882"	0,002	-18°55'04,82947"	0,002	862,096	0,005	152,688

Segundo a NTGIR (2010) do INCRA, é necessário que a precisão horizontal seja menor que 0,10 metros e que a precisão vertical seja menor que 0,30 metros, para vértices de apoio básico (Classe C1). Todos os pontos utilizados na análise atingiram os controles de qualidade exigidos com facilidade, pois além de se tratar de vetores de linhas de bases curtas, ainda foi utilizado tempo de rastreio superior ao exigido pela norma, já que esta exige um tempo de rastreio mínimo de 20 minutos para comprimentos de linhas de base de até 20 km.

Pode ser observado que as componentes verticais foram as que obtiveram menor precisão. Para as coordenadas determinadas com efemérides precisas, a precisão variou de 0,001 a 0,021 metros; enquanto que para as coordenadas obtidas com efemérides transmitidas, este valor variou de 0,005 a 0,021 metros.

Todas as estações apresentaram precisão da ordem milimétrica para as componentes horizontais, com exceção da CIV1. Esta estação ao ser processada utilizando órbitas transmitidas em tempo real, apresentou precisão de 0,012 m para a longitude e de 0,015 m para a latitude. Apesar de satisfazer a NTGIR, estes resultados não foram condizentes com a literatura, pois para componentes horizontais, em casos de linhas de base curtas, a precisão geralmente apresenta valores da ordem milimétrica.

A CIV1, notavelmente, foi a estação que apresentou resultados mais discrepantes ao variar as efemérides no processamento. Por exemplo, para a longitude, a precisão variou de 0,006m, utilizando órbita do IGS, para 0,012m, utilizando órbita transmitida. Fato semelhante ocorreu na componente latitude, que teve sua precisão variando de 0,006 para 0,015 metros. Assim, ao processar esta estação com efemérides precisas, obteve-se uma considerável melhoria nos resultados.

Verifica-se que o fator comprimento linha de base não foi tão determinante na obtenção dos dados, já que a estação FECIV13, por exemplo, que é o ponto mais afastado da base, apresentou precisões bastante satisfatórias, inclusive para a componente vertical. O fator tempo de rastreo também não pode ser considerado como limitante, já que foi mantido uma média de 30 minutos de rastreo para todos os pontos. Logo, possivelmente questões temporais como, por exemplo, a variação da disposição espacial dos satélites, foram responsáveis pelas variações das precisões.

Após a transformação das coordenadas geodésicas em coordenadas locais, foi possível verificar as discrepâncias entre os valores obtidos nos diferentes processamentos realizados. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 4, onde Δu representa as variações para a componente vertical, Δv para a componente norte e Δe para a componente este. Nos gráficos 1 a 3 é possível visualizar melhor a magnitude destas variações para cada componente.

Tabela 4. Discrepância entre as coordenadas das estações obtidas com efemérides precisas e transmitidas no SGL.

Estação	Δu	Δv	Δe
FECIV1	0,0005	0,0001	0,0013
CIV1	0,0016	0,0071	0,0016
CIV2	0,0000	0,0000	0,0000
CIV3	0,0000	0,0000	0,0000
FECIV3	0,0002	0,0007	0,0007
FECIV4	0,0000	0,0000	0,0000
FECIV5	0,0000	0,0000	0,0000
FECIV6	0,0002	0,0007	0,0007
FECIV8	0,0000	0,0000	0,0000
FECIV10	0,0000	0,0014	0,0001
FECIV13	0,0000	0,0014	0,0001
FECIV2	0,0000	0,0000	0,0000
CIV4	0,0114	0,0042	0,0037

Gráfico 1. Discrepâncias entre as soluções obtidas para a componente vertical das estações da rede GNSS local da UFU com seus respectivos dias de rastreo.

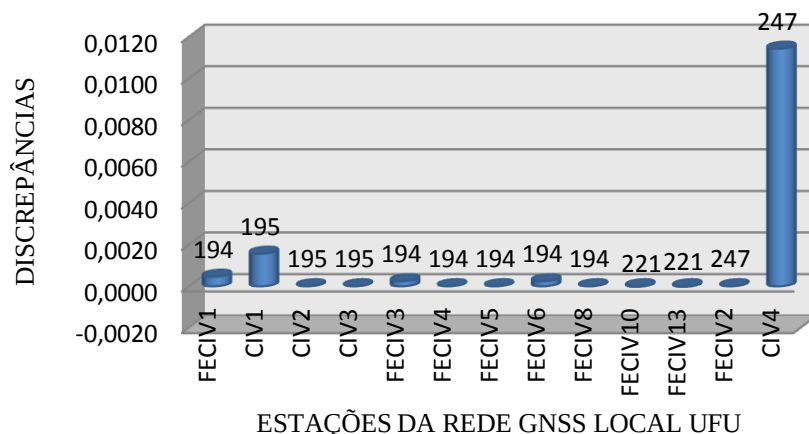


Gráfico 2. Discrepâncias entre as soluções obtidas para a componente este das estações da rede GNSS local da UFU com seus respectivos dias de rastreo.

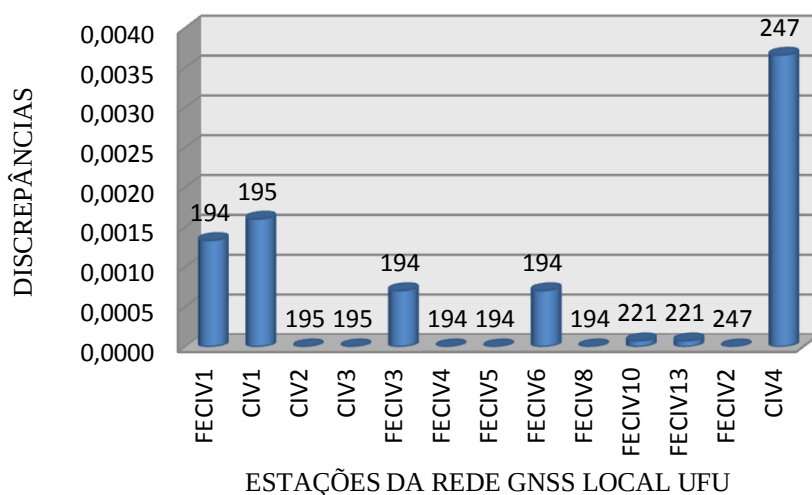
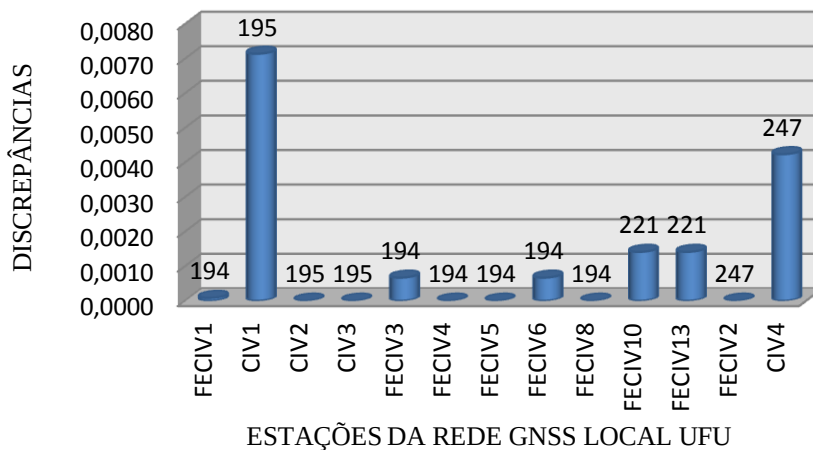


Gráfico 3. Discrepâncias entre as soluções obtidas para a componente norte das estações da rede GNSS local da UFU com seus respectivos dias de rastreo.



Observando a Tabela 4, verifica-se que para 6 estações, o processamento utilizando diferentes efemérides não resultou em variações para nenhuma componente, a saber: CIV2, CIV3, FECIV4, FECIV5, FECIV8 e FECIV2. As estações FECIV13 e FECIV10 apresentaram discrepâncias apenas para as componentes horizontais, não havendo variação para os resultados obtidos para a componente vertical.

A partir da análise do gráfico 1, nota-se que a estação CIV4 apresentou uma discrepância para a componente vertical superior as obtidas para as outras estações. Enquanto esta estação teve uma variação de 0,0114m, as demais apresentaram variações de ordem milimétrica ou ausência de variação.

Considerando todas as componentes, a maior variação verifica-se justamente para a componente vertical da estação CIV4. No entanto, um número maior de estações sofreram discrepâncias nas componentes horizontais (norte e este). No gráfico 2, tem-se que a componente leste obteve variação de 0,037m para a estação CIV4. A coleta de dados desta estação foi realizada no mesmo dia que foi feito a coleta da estação FECIV2, a qual não apresentou variação para nenhuma componente. Todavia, a coleta não foi simultânea.

No gráfico 3, observa-se que a estação CIV1 apresentou a variação mais considerável para a componente norte (0,071m). Novamente verifica-se que para dias iguais, ocorreram comportamentos diferentes: grandes variações e ausência destas.

4. Conclusões

No presente estudo, limitou-se a análise para linhas de base curtas. Para estes casos, foi verificado que o erro orbital pode ser negligenciado, já que as variações não foram tão significativas para a maioria das estações. Assim, para linhas de base menores que 10 km pode ser utilizado tanto efeméride transmitida quanto precisa.

Os valores encontrados foram condizentes com a literatura, pois para a componente vertical, houve discrepâncias da ordem centimétrica e para as componentes horizontais, da ordem milimétrica. Além disso, os resultados obedeceram as recomendações da NTGIR, atingindo precisões satisfatórias.

Agradecimento

Agradecimentos especiais a Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia, campus Santa Mônica, por ter fornecido os equipamentos necessários a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

IBGE. **Rede brasileira de monitoramento contínuo dos sistemas GNSS**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc_est.shtm>. Acesso em: 4 nov. 2012.

INCRA. **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 2º edição, fevereiro, 2010.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlin; New York: de Gruyter, 2003. 589p.

SOLER, T.; HOTHEM, L.D. **Coordinate Systems Used in Geodesy: Basic Definitions and Concepts**. In: Journal of Surveying Engineering, v.114, n.2, p.84-97,1988.

SPOFFORD, P. R.; REMONDI, B. W. **The national geodetic survey standard format SP3**. Disponível em: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/sp3_docu.txt>. Acesso: 2 nov. 2012 .

