

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/3: 595-607
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

USO INTEGRADO DOS SISTEMAS GALILEO E GPS: UMA ANÁLISE DA ACURÁCIA NO POSICIONAMENTO POR PONTO COM CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS

Galileo And GPS Systems Integrated Use: An Analysis Of The Accuracy In The Point Positioning With Atmospheric Corrections

**Paulo de Tarso Setti Júnior, Daniele Barroca Marra Alves
& Tayná Aparecida Ferreira Gouveia**

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, SP - Brasil
{paulotsetti, tayna.ppgcc}@gmail.com, danibarroca@fct.unesp.br

Recebido em 20 de Agosto, 2016/ Aceito em 1 de Abril, 2016
Received on August 20, 2016/ Accepted on April 1, 2016

RESUMO

O posicionamento terrestre a partir dos sistemas globais de navegação por satélite iniciou-se na década de setenta, com a criação do sistema americano GPS (*Global Positioning System*). A partir da década de oitenta, a União Europeia iniciou um projeto para desenvolvimento de um sistema próprio, que resultou no sistema Galileo, que em 2003 teve sua fase de definição concluída. A ideia de integração de ambas as constelações surge do grande número de satélites disponíveis (no mínimo 24 satélites GPS e 27 Galileo, quando esta estiver completa), o que proporcionaria melhor precisão em áreas com visibilidade restrita e maior possibilidade de obter boa geometria no rastreamento. No presente trabalho busca-se analisar as melhorias apresentadas no processamento de dados GPS e GPS em conjunto com Galileo no Posicionamento por Ponto com uso de pseudodistância, efemérides precisas e correções do atraso troposférico e ionosférico. Primeiramente é apresentada uma breve revisão das características do sistema GPS, bem como um histórico, características e estado da arte do sistema Galileo, e em seguida são realizados testes de posicionamento para períodos de março e julho de 2014. Para os testes foram utilizados dados de uma estação da Rede GNSS-SP; estes dados são disponibilizados em arquivos de observação no novo formato RINEX 3. Considerando-se todos os casos analisados nesse artigo, o uso integrado GPS e Galileo apresentou melhoria em relação ao uso independente do sistema GPS em 83,3% dos casos, melhoria essa que chega a 22,2%.

Palavras chaves: Posicionamento, Galileo, Integração GPS/Galileo.

ABSTRACT

Terrestrial positioning based on global navigation satellite systems was initiated in the seventies, with the creation of the American system GPS (*Global Positioning System*). In the eighties, European Union began a project to develop its own system, resulting in Galileo system, which has completed its definition phase in 2003. The idea of integrate both constellations comes from the large number of available satellites (at least 24 GPS satellites and 27 Galileo, when it is full), which would provide improved accuracy in areas with restricted visibility and higher possibility of obtaining good geometry on tracking. In this paper it is intended to analyze the improvements made in GPS and GPS along with

Galileo data processing using Point Positioning with pseudorange, precise ephemeris and tropospheric and ionospheric delay corrections. Firstly it is presented a brief review of the GPS system characteristics and the history, characteristics and state of the art of Galileo, and then are performed positioning tests for periods of March and July 2014. For testing it was used data from a station of GNSS-SP Network; these data are available in observation files in the new RINEX 3 format. Considering all the cases analyzed in this paper, the integrated use of GPS and Galileo showed improvement on the independent use of GPS in 83.3% of cases, reaching 22.2% of improvement.

Keywords: Positioning, Galileo, GPS/Galileo Integration.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações da Geodésia é a determinação precisa das coordenadas 3D de um determinado ponto na superfície terrestre (SEEBER, 2003), em relação a um referencial específico (MONICO, 2008). As atividades de posicionamento tiveram uma enorme evolução com o desenvolvimento da Geodésia Espacial, quando a posição de um objeto passou a ser determinada por meio de um sistema denominado GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que conta com constelações de satélites artificiais.

O GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido a partir da década de 1970 é, certamente, o mais conhecido e empregado globalmente dentre os sistemas disponíveis. Outros sistemas, entretanto, foram criados e já possuem satélites orbitando a Terra, como é o caso do sistema russo GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) que, assim como o GPS, já possui constelação completa, o chinês Beidou e o europeu Galileo.

Iniciado na década de 1980, o sistema Galileo, criado e mantido pela União Europeia, possui hoje em sua constelação um total de doze satélites. Do alto número de satélites disponíveis, surge o interesse de analisar possíveis melhorias na acurácia do posicionamento quando estes satélites são utilizados de modo combinado aos satélites GPS, uma vez que é de se esperar que um número maior de satélites rastreados torne melhor o ajustamento da posição do receptor (MONICO, 2008), melhor precisão em áreas com visibilidade restrita e maior possibilidade de obter boa geometria no rastreo (LAGO, FERREIRA & KRUEGER, 2002).

Tiberius *et al.* (2002) mostrou através de estudos teóricos que o uso combinado das duas constelações (GPS e Galileo) supera o uso de dupla frequência GPS, com alta taxa de sucesso na resolução de ambiguidade, mesmo

com dados de uma época em linhas de base curtas. Paziewski e Wielgosz (2013) mostraram, através de dados simulados, melhoria na taxa de sucesso de resolução de ambiguidade no uso combinado GPS e Galileo, e ainda uma vantagem na utilização de sinais Galileo de quádrupla frequência (E1, E5a, E5b, E5 (E5a + E5b)) em relação ao uso da dupla frequência GPS (L1 e L2). Odiijk e Teunissen (2013) mostraram, com o uso de dados GPS e dos dois satélites-teste Galileo (GIOVEs A e B), que a taxa de sucesso de resolução de ambiguidade passa de 70-90% com o uso do GPS para 86-99% no uso combinado.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o estado atual da constelação Galileo, bem como avaliar a acurácia do posicionamento com o uso combinado de dados GPS e Galileo em relação à acurácia obtida apenas com o uso da constelação GPS no Posicionamento por Ponto. O método utilizado para análise foi o Posicionamento por Ponto com uso de dados reais GPS e Galileo, corrigidos dos efeitos atmosféricos devido à influência da troposfera e ionosfera, ponderando-se as observações de acordo com o ângulo de elevação dos satélites, e uso de efemérides precisas.

2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

O GNSS envolve os sistemas de posicionamento por satélites atuais, dentre os quais pode-se destacar os sistemas GPS e GLONASS, ambos com constelações completas e operantes, e os sistemas Beidou e Galileo, ainda em fase de implantação. Além desses sistemas, também compõem o GNSS os sistemas de aumento - SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) -, como o WAAS (*Wide Area Augmentation Service*) nos Estados Unidos, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) na Europa, MSAS (*Multifunctional Satellite Augmentation System*) no Japão, GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented*

Navigation) na Índia, entre outros (ALVES, ABREU e SOUZA, 2013). A seguir é apresentada uma visão geral do GPS, bem como o histórico e estado atual do Galileo, sistemas estes que foram utilizados no presente estudo.

2.1 GPS

O NAVSTAR (*Navigation System with Time and Ranging*) GPS, ou simplesmente GPS, é um sistema de navegação por satélites de abrangência global (SEEBER, 2003) desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD – *Department of Defense*), com o objetivo inicial de ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas norte-americanas (MONICO, 2008). Em sua configuração final, disponível desde 1995, o sistema consiste de 24 satélites em órbita de aproximadamente 20200 km acima da superfície terrestre, com planos orbitais inclinados 55° em relação ao Equador; o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. A Fig. 1 ilustra a configuração da constelação GPS. O arranjo dos satélites foi elaborado de modo que pelo menos quatro satélites sejam vistos simultaneamente acima do horizonte, em qualquer lugar da Terra, 24 horas por dia (SEEBER, 2003). O sistema de referência utilizado é o WGS-84 (*World Geodetic System*).

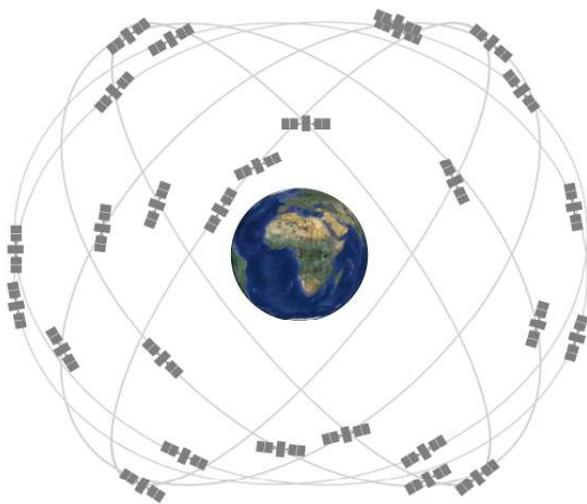


Fig. 1 – Configuração da constelação GPS.
Fonte: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>

Em relação às frequências transmitidas, o sistema utiliza a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), em que todos os satélites transmitem as mesmas frequências e a identificação desses é dada por um código

atribuído a cada satélite, o PRN (*Pseudo Random Noise*).

Cada satélite transmite duas ondas portadoras: L1 e L2, geradas da frequência fundamental (f_0) de 10.23 MHz, a qual é multiplicada por 154 e 120, respectivamente. As frequências e comprimentos de onda são apresentados na Tabela 1. Essas duas frequências são geradas simultaneamente, permitindo aos usuários corrigir os efeitos de primeira ordem provocados pela ionosfera. Aos satélites lançados a partir de 2010 foi acrescida uma terceira portadora, L5, também apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Portadoras do sistema GPS

Portadora	Fator (* f_0)	Frequência (MHz)	Comprimento de onda (cm)
L1	154	1575.42	19.0
L2	120	1227.60	24.0
L5	115	1176.45	25.5

Fonte: Adaptado de Monico (2008).

Atualmente (abril/2016), a constelação GPS é composta por 31 satélites operacionais (<http://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations/>).

2.2 Galileo

A decisão do governo norte-americano de não autorizar outras nações a participarem da construção e manutenção do sistema GPS levou a União Europeia (UE) a desenvolver uma solução própria para o GNSS (MONICO, 2008), uma vez que estudos apontavam que uma interrupção de dois dias no serviço de GPS em 2015 custaria para os setores financeiro e de transporte europeus algo em torno de um bilhão de euros (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER & WASLE, 2008).

Na década de 1980, a Agência Espacial Europeia (ESA – *European Space Agency*) começou seus estudos de diferentes concepções para o sistema. Em 1994, o Conselho Europeu (CE) pediu a Comissão Europeia que tomasse as iniciativas necessárias para contribuição em um sistema de navegação. A Europa previa uma abordagem em duas etapas: a primeira visava uma expansão nos sistemas existentes (GPS e GLONASS), que acabou resultando no desenvolvimento e implantação do EGNOS. Na segunda etapa, era necessário iniciar e apoiar o

trabalho preparatório para o design e organização de um novo sistema de posicionamento global para uso civil. Surgiu daí o sistema Galileo, cujo nome é uma homenagem ao astrônomo italiano Galileo Galilei (1564-1642), conhecido por ser o primeiro a apontar um telescópio para o espaço e por ter descoberto as quatro maiores luas de Júpiter, importantes para a navegação terrestre.

Inicialmente, foram lançados dois satélites Galileo, o GIOVE A (2005) e o GIOVE B (2008), utilizados para testar a tecnologia e assegurar as frequências atribuídas ao Galileo (MONICO, 2008). Ambos foram descomissionados em 2012. Dois satélites foram lançados então em 2011 e outros dois em 2012, durante a fase de validação (IOV – *In-Orbit Validation*). Em maio de 2012, um dos satélites lançados em 2012 apresentou problemas e parou de enviar dados. Em agosto do mesmo ano, o satélite voltou a transmitir dados apenas na frequência E1, sem transmissão na frequência E5 e sem dados de navegação (<http://gpsworld.com/galileos-troubled-e20-satellite-is-alive/>).

Os dois primeiros satélites de plena capacidade operacional (FOC - *Full Operational Capability*) foram lançados no dia 22 de agosto de 2014; entretanto, tais satélites não atingiram a órbita pretendida devido a uma falha no veículo lançador. A Fig. 2 ilustra o que aconteceu com a órbita destes satélites: em vermelho, é ilustrada a órbita desenvolvida por estes satélites e, em verde tracejado, a órbita pretendida. As órbitas dos satélites lançados em 2011 e 2012 são mostradas em verde contínuo. A órbita planejada para os dois satélites deveria ser circular, inclinada 56° em relação ao Equador, e em uma altitude de 23222 km. Os satélites instalaram-se em uma trajetória elíptica, com uma altitude máxima de 25900 km e mínima de 13700 km, com inclinação menor que a pretendida. Os satélites, entretanto, tiveram suas placas solares corretamente apontadas para o Sol, sob total controle da ESA (ESA, 2014).

Assim o quinto satélite, um dos dois lançados em 2014, sofreu uma série de manobras e, como resultado, subiu mais de 3500 km e sua órbita tornou-se mais circular. No dia 29 de novembro de 2014, o quinto satélite da constelação Galileo deu início à transmissão de sinais. O sexto satélite atingiu sua órbita em abril de 2015 (ESA, 2014).

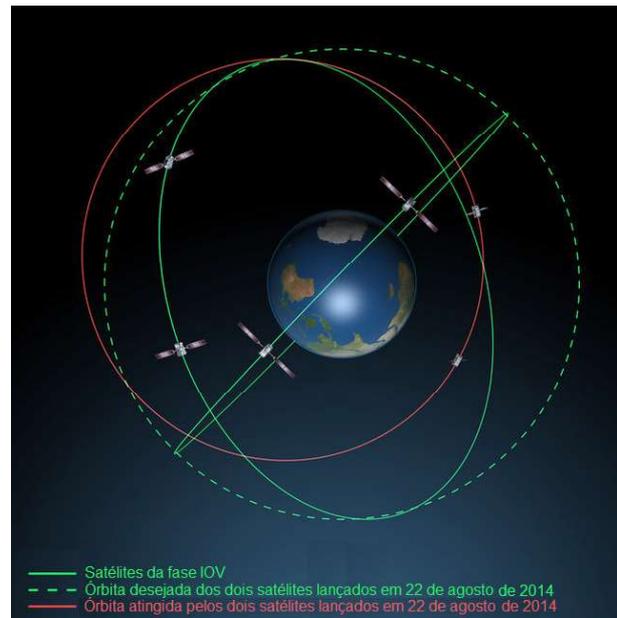


Fig. 2 – Órbita incorreta dos satélites lançados em 2014. Fonte: adaptado de ESA, 2014. Acesso: 09/jul/2015

No dia 27 de março de 2015, outros dois satélites foram lançados, atingindo órbitas circulares a 23522 km de altitude, aproximadamente 300 km acima do planejado. Ainda assim, o lançamento foi considerado de sucesso, uma vez que com o uso de seus próprios propulsores, a altitude planejada pode ser atingida. Com isto, foi aumentado para oito o número total de satélites da constelação. Dois satélites foram lançados no dia 11 de setembro de 2015, e outros dois no dia 26 de fevereiro de 2016, totalizando doze satélites em órbita. Dois novos satélites já estão programados para serem lançados em maio deste ano. Se seguidos os planos iniciais, a constelação deve estar completa em 2020.

Em 2011, a Comissão Europeia organizou um concurso de desenho relacionado ao espaço e à astronomia para crianças de 9 a 11 anos residentes nos países membros da União Europeia. As crianças vencedoras do concurso (uma de cada país membro) teria seu nome dado a um dos satélites Galileo lançados. A Tabela 2 apresenta o nome dos satélites já lançados, o ano de lançamento e o país que ele representa.

2.2.1 Segmentos Galileo

A concepção geral e a arquitetura do Galileo são similares as do GPS e GLONASS (HOFMANN-WELLENHOF,

Tabela 2: Nome dos satélites Galileo

Nome	País membro	Ano de lançamento
Thjis	Bélgica	2011
Natalia	Bulgária	2011
David	República Tcheca	2012
Sif	Dinamarca	2012
Doresa	Alemanha	2014
Milena	Estônia	2014
Adam	Irlanda	2015
Anastasia	Grécia	2015
Alba	Espanha	2015
Oriana	França	2015
Andriana	Chipre	2016
Liene	Letônia	2016

Fonte: Adaptado de http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/drawing-competition/index_en.htm

LICHTENEGGER & WASLE, 2008). Entretanto, além do segmento do usuário, o Galileo define três principais componentes: a componente global, a componente regional e a componente local (Fig. 3).

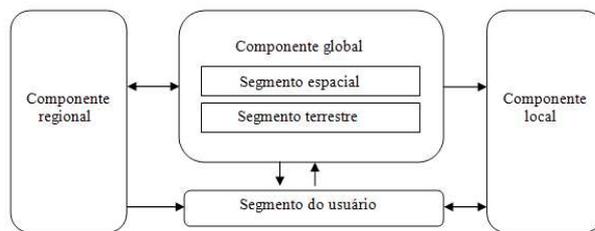


Fig. 3 - Arquitetura Galileo. Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle (2008).

A componente global é a componente central do sistema e subdivide-se nos segmentos espacial e terrestre. O segmento espacial é descrito com mais detalhes na seção 2.2.1.1 e o segmento terrestre na seção 2.2.1.2.

A componente regional consiste de uma rede de estações de monitoramento de integridade (ERIS - *External Region Integrity Systems*), e um centro de controle de integridade que determina informações de integridade limitadas para uma determinada região, com conexão direta aos satélites Galileo. A componente regional

complementa o conceito de integridade Galileo e permite atender aos requisitos de integridade para, por exemplo, aplicações marítimas e na aviação de determinados países e regiões (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER & WASLE, 2008; NURMI *et al.*, 2014).

Componentes locais podem ser implantados para melhorar o desempenho do Galileo localmente. Estes permitirão maior desempenho, tais como o fornecimento de sinal de navegação em áreas onde os sinais de satélite não podem ser recebidos (ESA, 2007). A notação “local” pode cobrir desde centenas de metros até milhares de quilômetros. Os elementos das componentes locais serão sistemas com cobertura espacial limitada para serviços particulares (tais como atividades aéreas e marítimas) e para aplicações especiais (como geociências e monitoramento).

2.2.1.1 Segmento espacial

O segmento espacial, quando completo, contará com trinta satélites (vinte e sete operacionais e mais três reservas, porém ativos) de órbita média (MEO - *Medium Earth Orbit*), distribuídos em três órbitas circulares, como ilustra a Fig. 4. A altitude será da ordem de 23222 km (ESA, 2011), com inclinação de 56° em relação ao plano do Equador. Tal configuração faz com que uma média de seis a oito satélites sejam visíveis em qualquer ponto da Terra. O período orbital será de aproximadamente 14h04min, com satélites ocupando a mesma posição no espaço apenas depois de aproximadamente dez dias. Com essa constelação e disposição dos satélites, os sinais Galileo proporcionarão boa cobertura até mesmo para latitudes até 75° N (que corresponde à ilha Cabo Norte (Noruega), ilha mais setentrional de toda a Europa). O sistema de referência utilizado é o GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*).

As frequências utilizadas pelos satélites compreendem a faixa de banda de 1.1 a 1.6 GHz. Os sinais Galileo são transmitidos em três bandas de frequência (E1, E5 e E6), usando quatro portadoras (E1, E5a, E5b e E6) (NURMI *et al.*, 2014). A Tabela 3 apresenta as portadoras dos sinais Galileo, suas respectivas frequências derivadas da frequência fundamental e seus respectivos comprimentos de onda. Assim como no GPS, a técnica utilizada para identificação dos satélites é a CDMA.

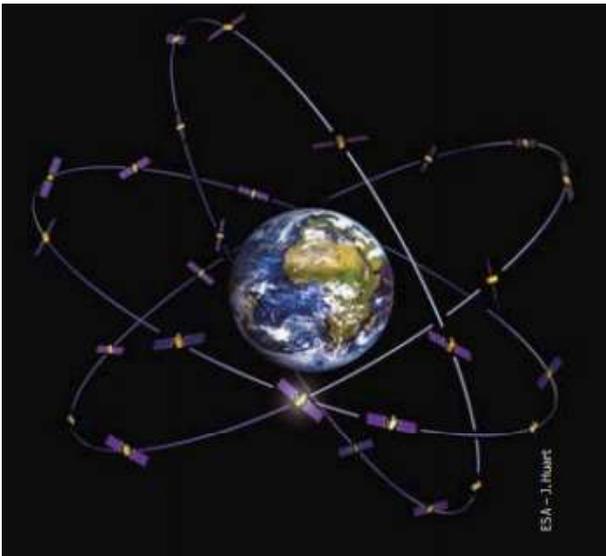


Fig. 4 – Configuração espacial dos satélites Galileo. Fonte: ESA, 2011. Acesso: 03/jul/2015

Tabela 3: Características das portadoras Galileo

Portadora	Fator (*f0)	Frequência (MHz)	Comprimento de onda (cm)
E1	154	1575,42	19,0
E6	125	1278,75	23,4
E5a	115	1176,45	25,5
E5b	118	1207,14	24,8

Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008)

As portadoras L5 e L1 do GPS compartilham as mesmas frequências da E5a e E1 do Galileo. Embora essa proximidade de algumas bandas Galileo com os sinais GPS possa causar interferência, necessitando de técnicas de modulação do sinal para reduzi-la, tal proximidade facilita o desenvolvimento de projetos de receptores que rastreiem tanto o sistema Galileo quanto o GPS (SEEBER, 2003). Para garantir a compatibilidade e interoperabilidade entre os sistemas Galileo e GPS, um acordo entre a União Europeia e os Estados Unidos foi feito, resultando na técnica de modulação MBOC (*Multiplexed Binary Offset Carrier modulation*), que minimiza os efeitos de interferência entre os sistemas na banda E1/L1 (RODRIGUEZ *et al.*, 2008; NURMI *et al.*, 2014).

Diferentemente dos outros sistemas globais, o sistema Galileo oferecerá cinco tipos de serviços (KAPLAN e HEGARTY, 2006; MONICO, 2008):

1. *Serviço de Acesso Aberto (OAS – Open Access Service)*: serviço básico de posicionamento, sem custos diretos, realizado usando os sinais de E1, E5a e E5b. Várias combinações também são possíveis, tal como um serviço de dupla frequência baseado no uso de E1 e E5a (para eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera) ou os serviços de frequência única, caso em que o erro ionosférico é minimizado através de um modelo, denominado NeQuick (NURMI *et al.*, 2014). É possível também a realização de serviços com frequência tripla, usando todos os sinais em conjunto (E1, E5a e E5b), que pode ser explorada para aplicações com alto grau de precisão;

2. *Serviço de Acesso Comercial (CAS – Commercial Access Service)*: voltado para usuários que exigem um serviço garantido e com contrato de responsabilidade, realizado com dois sinais adicionais na faixa de 1278.750 MHz, tendo ainda a capacidade de incluir os dados comerciais dentro dos sinais abertos;

3. *Serviço Público Regulamentado (PRS – Public Regulated Service)*: dedicado para aplicações de segurança nacional, como a polícia e os bombeiros, será realizado em dois sinais, um na faixa de 1575,420 MHz e outro na banda 1278,750 MHz. Estes sinais são criptografados, o que permite a implementação de um sistema de controle de acesso;

4. *Serviço de busca e resgate (SAR – Search and Rescue Service)*: satélites Galileo serão capazes de captar sinais de emergência na frequência 406 MHz (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER & WASLE, 2008) e enviá-los para centros de resgate nacionais. A partir disso, um centro de resgate poderá saber a localização de um acidente. Pelo menos um satélite Galileo estará visível em qualquer ponto da Terra, de modo que torne o alerta de socorro possível em tempo real.

5. *Serviço com Segurança de Vida (SAS – Safety of Life Service)*: usado para aplicações críticas em segurança, como aviação civil, este serviço baseia-se nos mesmos sinais que o OAS, adicionando informações de integridade aos usuários.

De maneira geral, pode-se dizer que o Serviço Aberto (OAS) Galileo assemelha-se bastante ao serviço aberto GPS (SPS – *Standard Positioning Service*) tão conhecido e utilizado atualmente.

2.2.1.2 Segmento terrestre

Estão sendo instaladas estações de monitoramento em todo o território terrestre, em razão da abrangência global do sistema. Ao todo, aproximadamente 30 estações (*Galileo Sensor Stations – GSS*) darão apoio à determinação de órbitas e sincronização de tempo. Elas proporcionarão dados para os dois GCCs (*Galileo Control Centers*), localizados em Oberpfaffenhofen, na Alemanha, e em Fucino, na Itália (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). Um desses centros é responsável pela geração das mensagens de navegação e sistema de tempo, enquanto o outro é responsável pelo controle da integridade (MONICO, 2008; NURMI *et al.*, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

Nesse trabalho visou-se avaliar o impacto da utilização do sistema Galileo integrado ao sistema GPS na acurácia do Posicionamento por Ponto Simples, em comparação com a acurácia obtida no posicionamento convencional utilizando apenas a constelação GPS. Para tanto, foi implementada uma rotina na linguagem C++ para realização do Posicionamento por Ponto Simples utilizando apenas os dados GPS e, depois, combinando-se os dados GPS e Galileo; os detalhes da implementação são apresentados na seção 3.2. Os dados de pseudodistância dos satélites GPS e Galileo (bem como das outras constelações que compõem o GNSS) estão disponíveis no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) 3.02, apresentado na seção 3.1.

3.1 Arquivo RINEX 3.02

Os dados enviados pelos satélites GNSS recebidos pelos receptores podem ser armazenados no formato RINEX. Tal formato foi proposto por Gurtner *et al* em 1989, baseado em pesquisas da Universidade de Berna, na Suíça (SEEBER, 2003). Desde a sua publicação, diversas revisões e modificações foram introduzidas, originando diversas versões para o formato. A versão 3 do formato foi lançada em 2006, de modo a conter dados de todos os sistemas GNSS, e não apenas GPS e GLONASS,

como nas versões anteriores.

Algumas estações da Rede GNSS-SP (<http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/rede-gnss-sp2089/>), equipadas com receptores NetR9, já rastreiam todos os satélites GNSS, armazenando seus dados no formato RINEX 3.02. Este novo formato possui algumas mudanças importantes com relação à comumente utilizada versão 2.0.

A Fig. 5 apresenta um trecho de um arquivo de observação RINEX 3.02. Nela, pode-se observar as principais alterações ocorridas com relação à versão anterior do arquivo, das quais pode-se destacar: no cabeçalho, são apresentados todos os satélites (através de uma letra identificadora da constelação e o número do satélite) disponíveis durante o período de coleta de dados, seguidos do número de épocas em que cada uma das portadoras (também apresentadas no cabeçalho) foi armazenada. Outra alteração diz respeito à forma com que são apresentados os satélites disponíveis em cada época do arquivo: neste, cada satélite é listado seguido de suas medidas de pseudodistância e fase para cada época, diferentemente da versão anterior, que apresentava todos os satélites logo no início da época, e só então suas medidas de pseudodistância e fase eram listados.

3.02	OBSERVATION DATA	Mixed (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE
-----			COMMENT
SPTU			MARKER NAME
GEODETIC			MARKER TYPE
GNSS Observer	Trimble		OBSERVER / AGENCY
5239K52833	NetR9	4.85	REC # / TYPE / VERS
11118901	TRM57971.00		ANT # / TYPE
3766123.6341	-4567433.0299	-2367324.3507	APPROX POSITION XYZ
	0.0080	0.0000	0.0000
G	8 C1C C2W C2X CSX L1C L2W L2X L5X		ANTENNA: DELTA H/E/N
R	8 C1C C1P C2C C2P L1C L1P L2C L2P		SYS / # / OBS TYPES
E	8 C1X CSX C7X CSX L1X L5X L7X L8X		SYS / # / OBS TYPES
C	6 C1I C6I C7I L1I L6I L7I		SYS / # / OBS TYPES
2014	7 18 0 0	0.00000000	GPS
2014	7 18 23 59	59.00000000	GPS
0			TIME OF FIRST OBS
16			TIME OF LAST OBS
31			RCV CLOCK OFFS APPL
			LEAP SECONDS
			# OF SATELLITES
C13	14 2 2 2 2 2		PRN / # OF OBS
E19	3600 3600 3600 3600 3600 3600		PRN / # OF OBS
G04	3600 3600 0 0 3600 3600		PRN / # OF OBS
G05	3600 3600 3600 0 3600 3600		PRN / # OF OBS
G06	2683 1910 2532 2536 2549 1910 2532 2536		PRN / # OF OBS
G07	3600 3600 3600 0 3600 3600 3600 0		PRN / # OF OBS
G08	3600 3600 0 0 3600 3600 0 0		PRN / # OF OBS
R01	1772 1771 1771 1704 1771 1771 1771 1702		PRN / # OF OBS
R24	3600 3600 3600 3600 3600 3600 3600 3600		PRN / # OF OBS
			END OF HEADER
>	2014 07 18 00 00	0.00000000 0 26	
C13	27014826.750 5		
E19	24404964.031 8 24404965.102 8 24404965.852 8 24404966.082 9 128248993.279		
G04	25176513.867 6 25176518.449 3		132303497.535
G05	33732784.164 8 33732789.176 6 33732787.810 7		110000220.740

Fig. 5 – Trecho de arquivo de observação RINEX 3, para o dia 18/07/2014

Um detalhamento completo do formato RINEX 3.02 pode ser encontrado em <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf>.

3.2 Posicionamento por Ponto Simples

O posicionamento por ponto é um posicionamento absoluto no qual se necessita apenas de um receptor (KAPLAN e HEGARTY, 2006; MONICO, 2008). O método tem sido empregado em navegação de baixa precisão e levantamentos expeditos. É realizado com o uso da pseudodistância, com efemérides precisas ou transmitidas, podendo ainda ser realizadas correções atmosféricas.

O ajustamento da posição do receptor através do método de Posicionamento por Ponto Simples foi realizado pelo método paramétrico, com ponderação de acordo com o ângulo de elevação dos satélites, visto que observações de satélites com baixo ângulo de elevação atravessam um caminho maior pela atmosfera, de modo a serem mais afetadas por esta; o efeito do multicaminho também é maior. Dalbello, Alves e Monico (2007) fizeram testes para definição da melhor função para ponderação das observações no posicionamento DGPS (Fig. 6), obtendo como resultado a função ‘ângulo de elevação ao quadrado’. Neste trabalho, testes foram realizados com estas mesmas funções, e a melhor acurácia (até 41,2% melhor em relação ao uso da matriz identidade, nos casos analisados) é também obtida com a ponderação das observações em função do ângulo de elevação ao quadrado. Foi utilizada máscara de elevação de 10°.

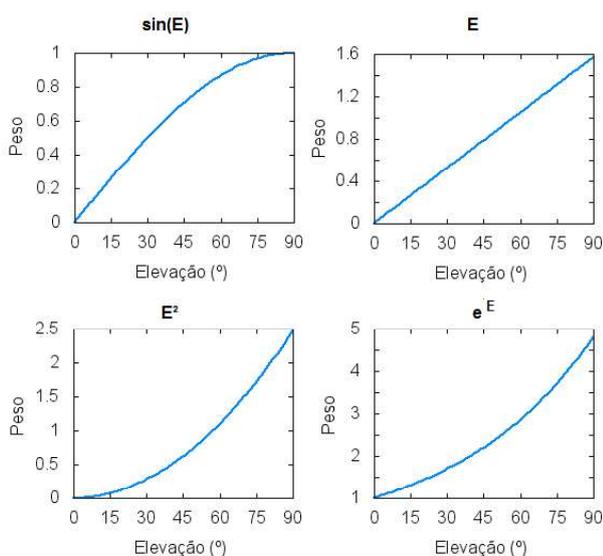


Fig. 6 – Possíveis funções a serem utilizadas na matriz peso das observações

As observações de pseudodistância foram corrigidas dos efeitos troposféricos através do modelo empírico de Hopfield (SEEBER, 2003), com uso da função de mapeamento de Niell (MONICO, 2008), e dos efeitos ionosféricos através do Modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987) para atraso ionosférico. Para a formulação e maiores detalhes do Posicionamento por Ponto, bem como das correções atmosféricas, o leitor pode consultar Vani, Monico e Shimabukuro (2014) e Monico (2008), uma diferença está no fato de se utilizar efemérides precisas no presente artigo. Foram utilizadas efemérides precisas, disponibilizadas pelo IGS (*International GNSS Service*) para os satélites GPS e pelo TUM (*Technische Universität München*), centro associado ao IGS, para os satélites Galileo. As efemérides transmitidas GPS (arquivo de navegação) foram utilizadas na obtenção dos coeficientes ION ALPHA e ION BETA para posterior aplicação no modelo de Klobuchar. Como os sistemas GPS e Galileo compartilham da mesma frequência na portadora L1 e E1, respectivamente, o modelo de Klobuchar pode ser também utilizado para correção ionosférica da pseudodistância dos satélites Galileo, ainda que a acurácia máxima possa não ser alcançada, uma vez que as órbitas dos dois sistemas são diferentes (NURMI *et al.*, 2014).

A estação escolhida para determinação das coordenadas foi a SPTU, localizada na cidade de Tupã e pertencente à rede GNSS-SP, e uma das quatro estações atualmente equipadas com receptor Trimble NetR9 da Rede GNSS-SP. Como coordenadas de referência foram consideradas as coordenadas oficiais da estação, em SIRGAS 2000, época 2000,4, atualizadas para a época do levantamento. Foram utilizadas observações de pseudodistância na frequência L1 para as observações GPS e E1 para observações Galileo, com intervalo de coleta de 1 segundo. Para solução da posição do receptor para cada época, as coordenadas dos satélites GPS (disponíveis a cada 15 minutos) e Galileo (disponíveis a cada 5 minutos) foram interpoladas empregando o método de Chebyshev.

Para determinação dos períodos de processamento, foram escolhidos um dia de

março e um dia de julho de 2014 com pelo menos dois satélites Galileo visíveis e, a partir disso, sabendo-se que a repetibilidade da constelação Galileo é de dez em dez dias, outros dois dias de março e dois dias de julho foram seleccionados. Deste modo, foram então seleccionados os dias 4, 14 e 24 de março de 2014 (dias do ano 63, 73 e 83, respectivamente) e os dias 8, 18 e 28 de julho de 2014 (dias do ano 189, 199 e 209, respectivamente). A Fig. 7 apresenta o número de satélites visíveis durante as 24 horas dos seis dias seleccionados. A partir da Fig. 7 (A, B e C), determinou-se que o período de processamento seria das 18 às 24 horas do Tempo Universal (UT – *Universal Time*) para os dias de março e, a partir da Fig. 7 (D, E e F), das 6 às 12 horas UT para os dias de julho, de modo a haver sempre dois ou três satélites Galileo no ajustamento combinado. É válido acrescentar que, durante

a época dos processamentos, quatro satélites Galileo já haviam sido lançados. Entretanto, um destes já vinha apresentando problemas no relógio, tendo inclusive parado de funcionar em maio de 2014, como descrito na seção 2.2. Assim, como foram realizadas análises considerando alta e baixa atividades ionosféricas (dias de março e julho), apenas os três satélites saudáveis disponíveis na época foram utilizados.

Como resultado do posicionamento, obteve-se a posição estimada da estação em coordenadas cartesianas (X,Y,Z) em IGB08, sua transformação em coordenadas geodésicas locais (E,N,h), o atraso do relógio do receptor (dtr) e suas respectivas precisões. Através dos valores obtidos, calculou-se o erro médio quadrático (EMQ) horizontal e vertical para cada um dos dias de processamento, bem como o EMQ 3D.

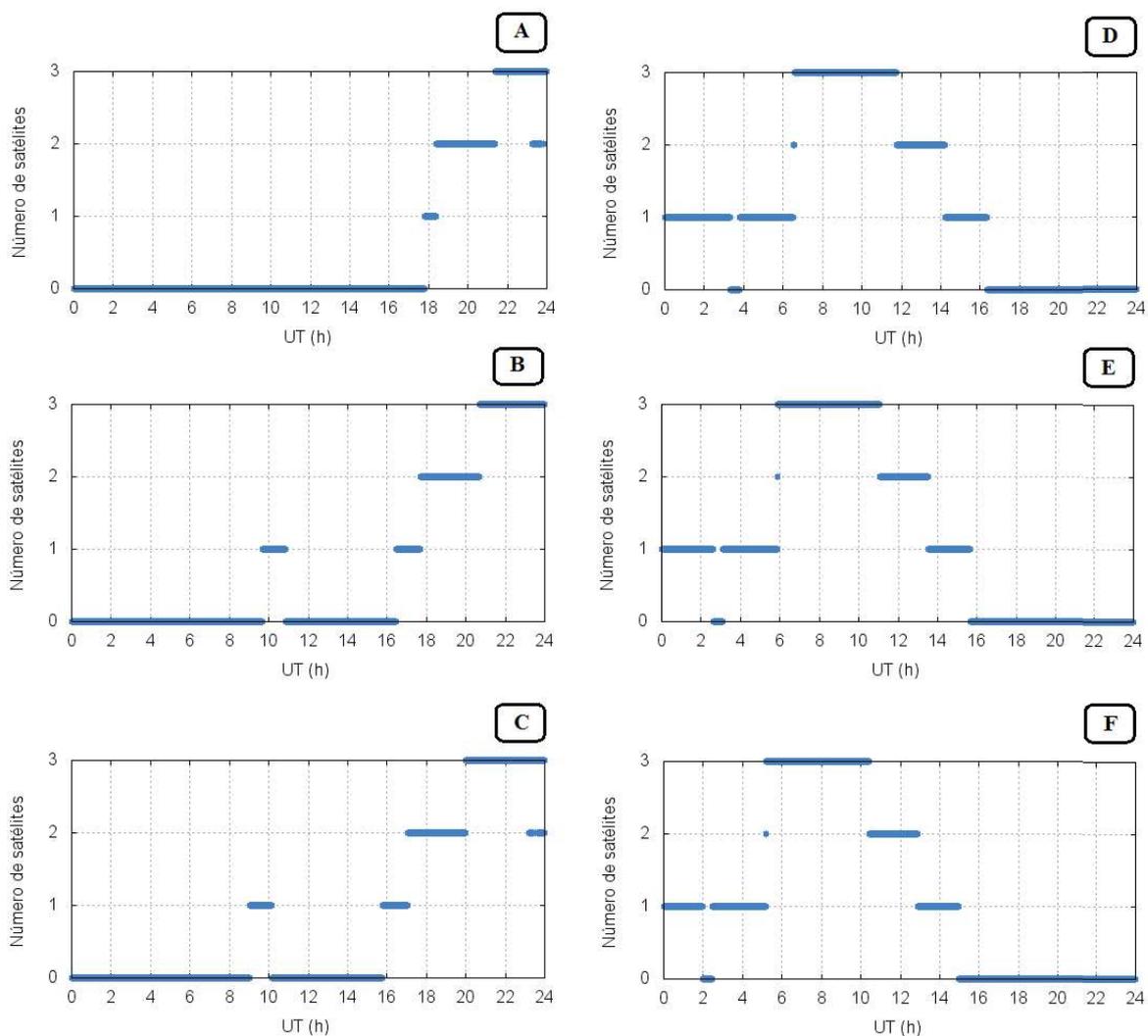


Fig. 7 - Número de satélites Galileo visíveis para os dias (a) 63, (b) 73, (c) 83, (d) 189, (e) 199 e (f) 209

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados do EMQ horizontal e vertical, época a época, foram plotados para os seis períodos analisados, e são apresentados nas Figs. 8 (dias de março) e 9 (dias de julho).

O EMQ de cada época foi calculado extraindo-se a raiz quadrada da soma dos quadrados da discrepância na posição estimada em relação às coordenadas atualizadas da estação e do desvio padrão na estimativa da posição extraído da matriz variância covariância do ajustamento.

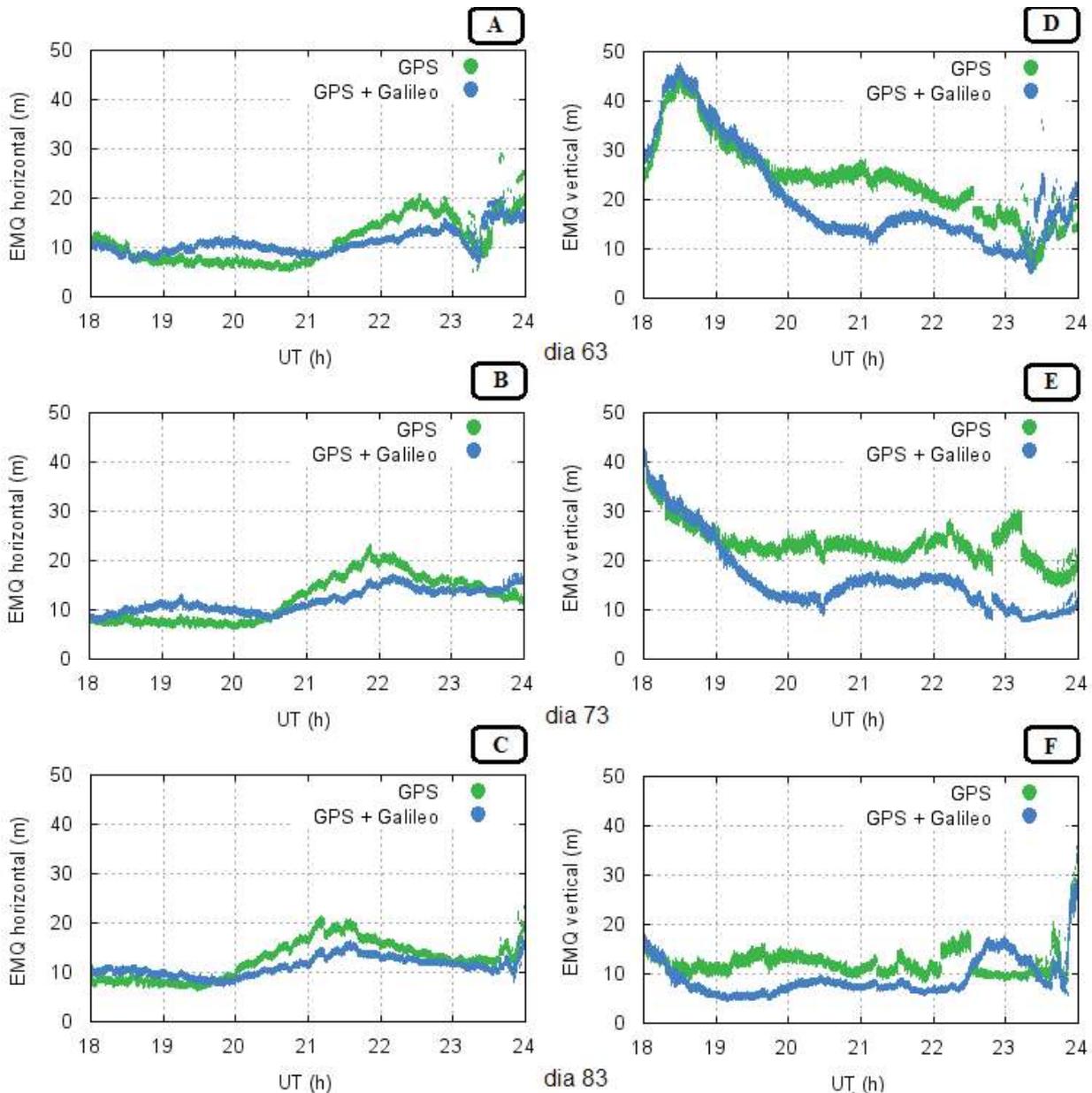


Fig. 8 - EMQ horizontal para os dias (A) 04, (B) 14 e (C) 24 de março de 2014; e EMQ vertical para os dias (D) 04, (E) 14 e (F) 24 de março de 2014

Nota-se que a maior melhoria do uso integrado GPS e Galileo dá-se na componente vertical, como pode-se observar claramente na Fig. 8 (D), (E) e (F) (melhoria esta que varia entre 14,1%, para o dia 63 e 29,8%, para o dia 73), ainda que na componente horizontal haja uma melhoria significativa no uso combinado

(variação entre 1,4%, para o dia 63, e 11,3%, para o dia 83). Nos dias de julho (Fig. 9), integrar o sistema Galileo ao GPS proporcionou melhorias no EMQ vertical da estimativa da posição da estação na maior parte dos períodos analisados dos três dias (melhorias variam entre 11,4%, para o dia 209, e 15,3%, para o dia 189). Entretanto,

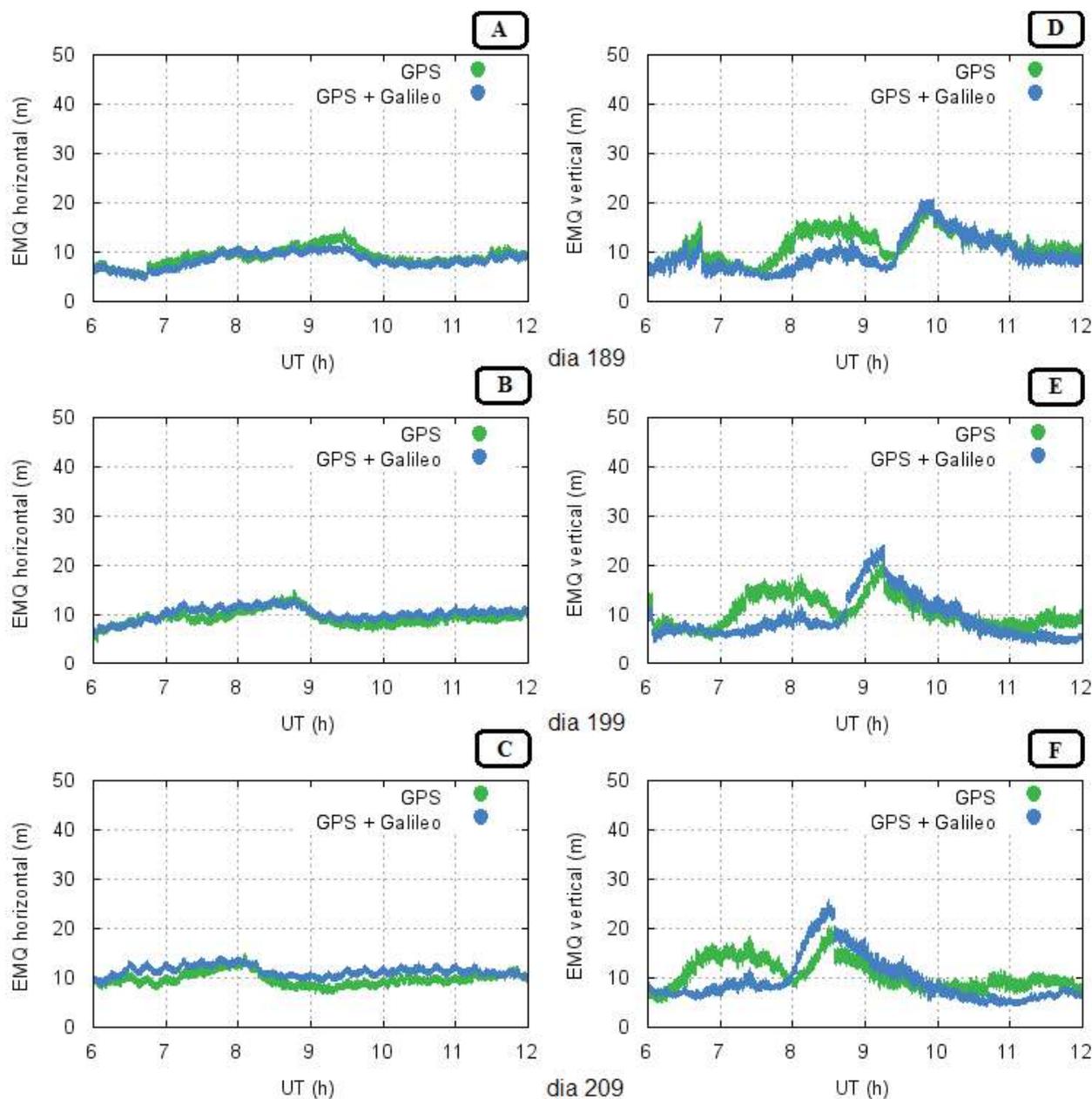


Fig. 9 - EMQ horizontal para os dias (A) 08, (B) 18 e (C) 28 de julho de 2014; e EMQ vertical para os dias (D) 08, (E) 18 e (F) 28 de julho de 2014

esta melhoria não é também verificada no EMQ horizontal (Fig. 9 (A), (B) e (C)). O EMQ horizontal é praticamente igual para os dois tipos de processamento para o dia 189; para os dias 199 e 209, o uso integrado GPS e Galileo provoca uma pequena piora no resultado horizontal obtido (-9,0% e -16,2%, respectivamente).

Como esperado, é possível ainda observar nas Fig.s 8 e 9 que o EMQ maior dá-se na componente vertical, chegando a 45 metros no dia 04 de março. Ainda, detecta-se que o EMQ é maior nos dias de março, haja visto que as

estações do ano influenciam na densidade total de elétrons presentes na atmosfera terrestre, sendo os efeitos da ionosfera maiores nos equinócios e menores nos solstícios (CAMARGO, 1999).

A Tabela 4 e a Fig. 10 apresentam o erro médio quadrático 3D dos períodos de processamento em ambos os casos. Observa-se que a inclusão dos satélites Galileo no ajustamento da posição da estação trouxe melhorias em 5/6 (83,3%) dos casos, piorando em apenas 3,5% o EMQ 3D de um dos dias de processamento.

Tabela 4: EMQ (m) do posicionamento GPS e GPS + Galileo

Dia	GPS	GPS + Galileo
63	27,523	24,207
73	27,021	21,022
83	17,866	14,712
189	14,682	13,032
199	14,377	14,112
209	14,705	15,219

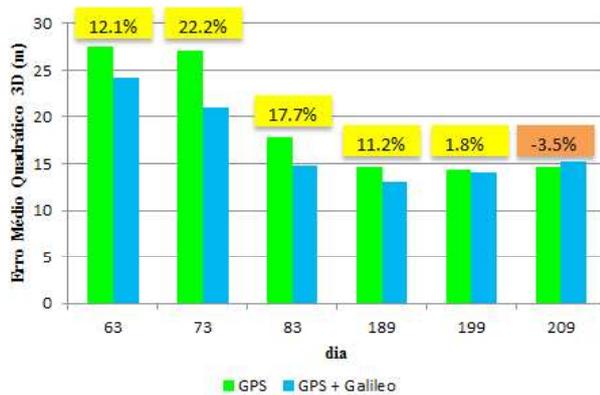


Fig. 10 – EMQ 3D do posicionamento GPS e GPS + Galileo, e diferença relativa do posicionamento combinado em relação ao GPS (em percentual).

Verifica-se ainda que a melhoria no EMQ 3D foi mais significativa nos dias de março (dias estes em que o EMQ 3D era também maior, se comparado aos dias de julho), em que o efeito da ionosfera sobre a acurácia do posicionamento é maior. Para estes dias, a melhoria variou de 12,1%, no dia 63, a 22,2%, no dia 73. Para os dias de julho, a variação entre os dois tipos de processamento analisados é menor, variando de 11,2%, no dia 189, a -3,5%, no dia 209.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou validar a utilização de dados combinados GPS + Galileo para o Posicionamento por Ponto Simples com correções atmosféricas, haja visto que, quando o trabalho foi realizado a constelação Galileo contava com oito satélites lançados. Os testes foram realizados para Posicionamento por Ponto implementado em linguagem C++ pelos autores deste trabalho devido à ausência de softwares comerciais que já incluem em seus processamentos os novos sistemas que compõem o GNSS, tais como o Galileo e o Beidou. Com o desenvolvimento de receptores que já coletam dados de todos os sistemas

GNSS, o processamento integrado de todas as constelações em softwares comerciais é uma tendência para um futuro próximo.

Os resultados apresentam que há sim uma melhoria no posicionamento quando a constelação GPS é utilizada em conjunto com a constelação Galileo. A melhoria maior dá-se na componente vertical da posição, componente esta normalmente mais afetada pela atmosfera terrestre. Tal melhoria pode ser de grande benefício em atividades geodésicas de alta acurácia.

Embora nos resultados obtidos no Posicionamento por Ponto Simples tenham sido usados apenas três satélites Galileo, atualmente a constelação já conta com 12 satélites disponíveis para posicionamento. Assim, a posição do usuário poderá em breve ser obtida com uma maior acurácia.

Além do fato de que mais dados proporcionam um melhor ajustamento, é importante ainda dizer que, quando a constelação Galileo estiver completa, com seus 27 satélites, o número total de satélites na constelação GPS e Galileo ultrapassará 50. Com isto, será possível aumentar a máscara de elevação do posicionamento, e ainda assim ter um número adequado de satélites disponíveis.

Os fatos apresentados acima, em conjunto com os resultados obtidos neste trabalho conferem a validade do posicionamento combinado das constelações GNSS. Estudos futuros poderão ainda ser realizados com a utilização de métodos mais precisos de posicionamento, tais como o Posicionamento por Ponto Preciso e Posicionamento em Rede. Além dos sistemas GPS e Galileo mencionados, têm-se ainda operacional o sistema russo GLONASS e em desenvolvimento o sistema Beidou. Em conjunto, todas estas constelações deverão tornar a acurácia da posição do usuário cada vez melhor.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento da bolsa do primeiro autor (processo 2014/01301-7) e pelo projeto Regular da segunda autora (processo 2012/19906-7). Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa para a segunda autora e ao projeto Universal (processo 470112/2012-3).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, C. M. D.; MONICO, J. F. G.; ROMÃO, V. M. R. Análise da acurácia no PPP a partir da solução de ambiguidades GPS em curtos períodos de ocupação. **Revista Brasileira de Cartografia**, N° 63, Edição Especial Geodésia e Topografia, 2011.
- ALVES, D. B. M.; ABREU, P. A. G.; SOUZA, J. S. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 1, p. 8-13, 2013.
- CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- DALBELO, L. F. A.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. Funções Matemáticas Aplicadas na Determinação dos Pesos no Posicionamento DGPS. In: **XXX CNMAC**, 2007, Florianópolis. 11p.
- ESA (European Space Agency). **Birth of the European Satellite Navigation Constellation**. 2011. Disponível em < http://download.esa.int/docs/Galileo_IOV_Launch/BR-297_Galileo_web.pdf>. Acesso: julho de 2015.
- ESA (European Space Agency). **Galileo Satellites – Status Update**. 2014. Disponível em < http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_satellites_status_update>. Acesso: julho de 2015.
- ESA (European Space Agency). **Galileo System**. 2007. Disponível em < http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_system>. Acesso em: julho de 2015.
- ESA (European Space Agency). **Salvage in space: recovering Galileo 5 and 6**. 2014. Disponível em http://esamultimedia.esa.int/docs/galileo/Galileo_Sav_flyer_j15_low-res.pdf. Acesso em: julho de 2015.
- GURTNER, W.; MADER, G.; MACARTHUR, D. A common exchange format for GPS Data. Proc. **5th International Geodesy Symposium Satellite Positioning**, Las Cruces, USA, Vol. 2: 920-931, 1989.
- HOFMANN - WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo and more**. New York: Springer-Verlage Wien, 2008. 501p.
- KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS, Principles and Applications**. New York: ArtechHouse, 2006. 206p.
- KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, AES-23, n. 3, p. 325–331, Maio 1987.
- LAGO, I. F.; FERREIRA, L. D. M.; KRUEGER, C. P. GPS e GLONASS: aspectos teóricos e aplicações práticas. In: **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 8, no 2, p.37-53, 2002.
- MONICO, J. F. G.. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.
- NURMI, J.; LOHAN, E. S.; SAND, S.; HURSKAINEN, H. (edit.) **Galileo Positioning Technology**. New York: Springer, 2014. 327p.
- ODIJK, D.; TEUNISSEN, P. J. G. Characterization of between-receiver GPS-Galileo inter-system biases and their effect on mixed ambiguity resolution. **GPS Solutions**, 17(4):521–533, 2013.
- PAZIEWSKI, J. AND WIELGOSZ, P. Assessment of GPS + Galileo and Multi-Frequency Galileo Single-Epoch Precise Positioning with Network Corrections. **GPS Solutions**, 18, 571-579, 2013.
- RODRIGUEZ, J. A. A.; HEIN, G. W.; WALLNER, S.; ISSLER, J. L.; RIES, L.; LESTARQUIT, L.; LATOUR, A.; GODET, J.; BASTIDE, F.; PRATT, T.; OWEN, J. The MBOC Modulation: The Final Touch to the Galileo Frequency and Signal Plan. In: **Navigation**, Volume 55, Issue 1, pages 15–28, Spring 2008.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- TIBERIUS C, PANY T, EISSFELLER B, JOOSTEN P, VERHAGEN S (2002) 0.99999999 confidence ambiguity resolution with GPS and Galileo. **GPS Solutions** 6(1-2):96–99.
- VANI, B. C.; MONICO, J. F. G.; SHIMABUKURO, M. H. Fundamentos e aspectos computacionais para posicionamento por ponto GPS. **Revista Brasileira de Geomática**, v.2, n. 1, 13-24, 2014.