

30 anos de utilização de redes GNSS em Portugal: aplicação em geodinâmica

Luísa Bastos^{1,2} e Clara Lázaro¹

¹ Universidade do Porto, Faculdade de Ciências

² Universidade do Porto, Observatório Astronómico



Motivação

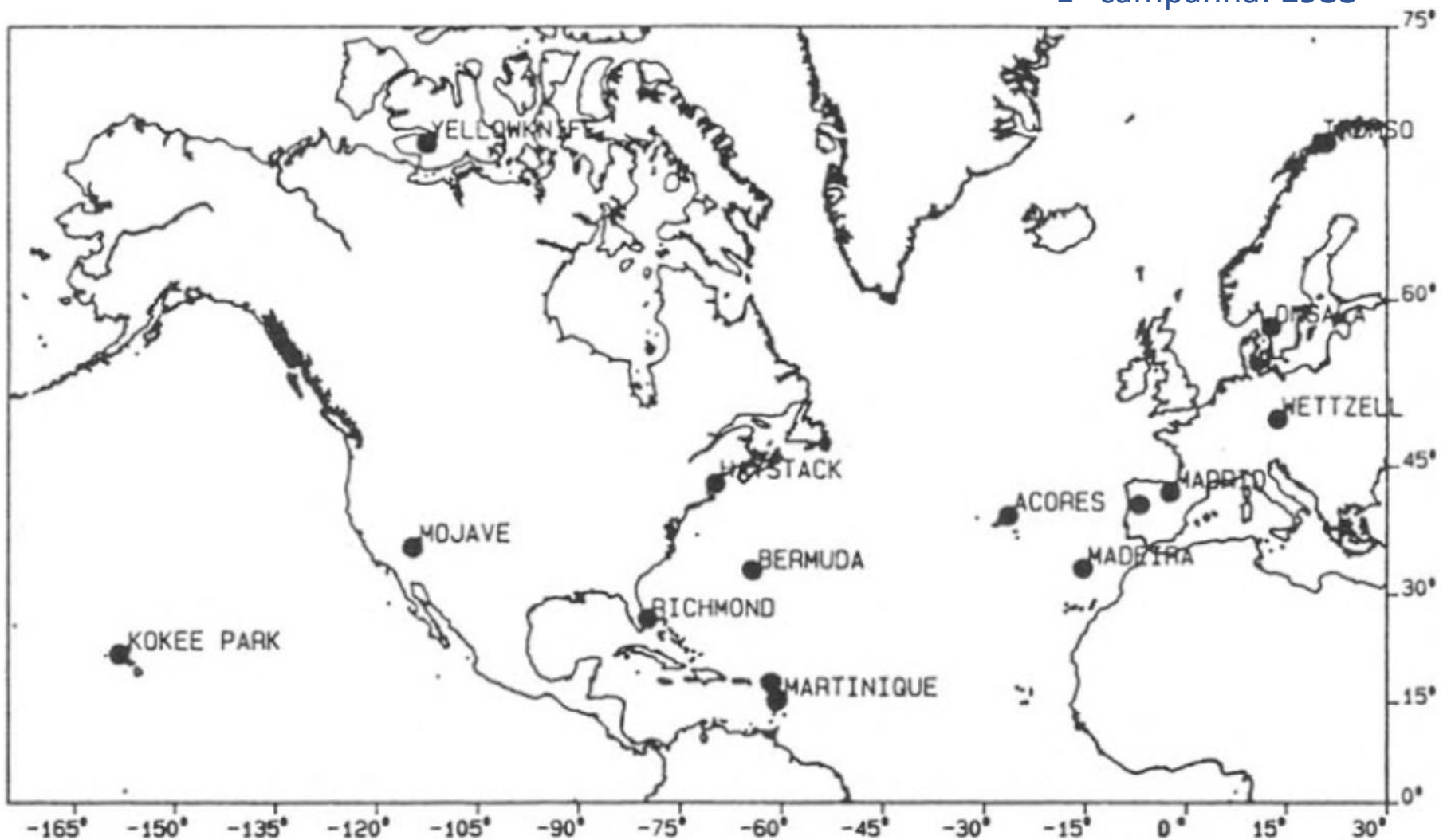
- Revisitar o início da utilização do Sistemas de Posicionamento Global (GPS) em Portugal;
- Assinalar os 30 anos do lançamento do projecto TANGO e relembrar as instituições e colegas ligados ao projecto;
- Reflectir sobre o que mudou ao longo das últimas 3 décadas;
- Perspectivar possibilidades de evolução futura.

Enquadramento

- O projecto **TANGO** (TransAtlantic Network for Geodesy and Oceanography) foi planeado e começou **no final da década de 80**, no início da aplicação do GPS à geodinâmica.
- O projecto tinha como objectivo contribuir para uma melhor caracterização da geodinâmica da chamada "Junção Tripla dos Açores", na confluência das placas norte-americana, euro-asiática e nubia.
- A par do projecto CASA (Central And South America) UNO (JPL) constituiu **uma das primeiras tentativas de estabelecimento de uma rede intercontinental**.
- A rede TANGO foi estabelecida em 1988 com estações GPS nos continentes europeu e americano: incluía estações no continente e ilhas (Açores e Madeira) e na América Central.

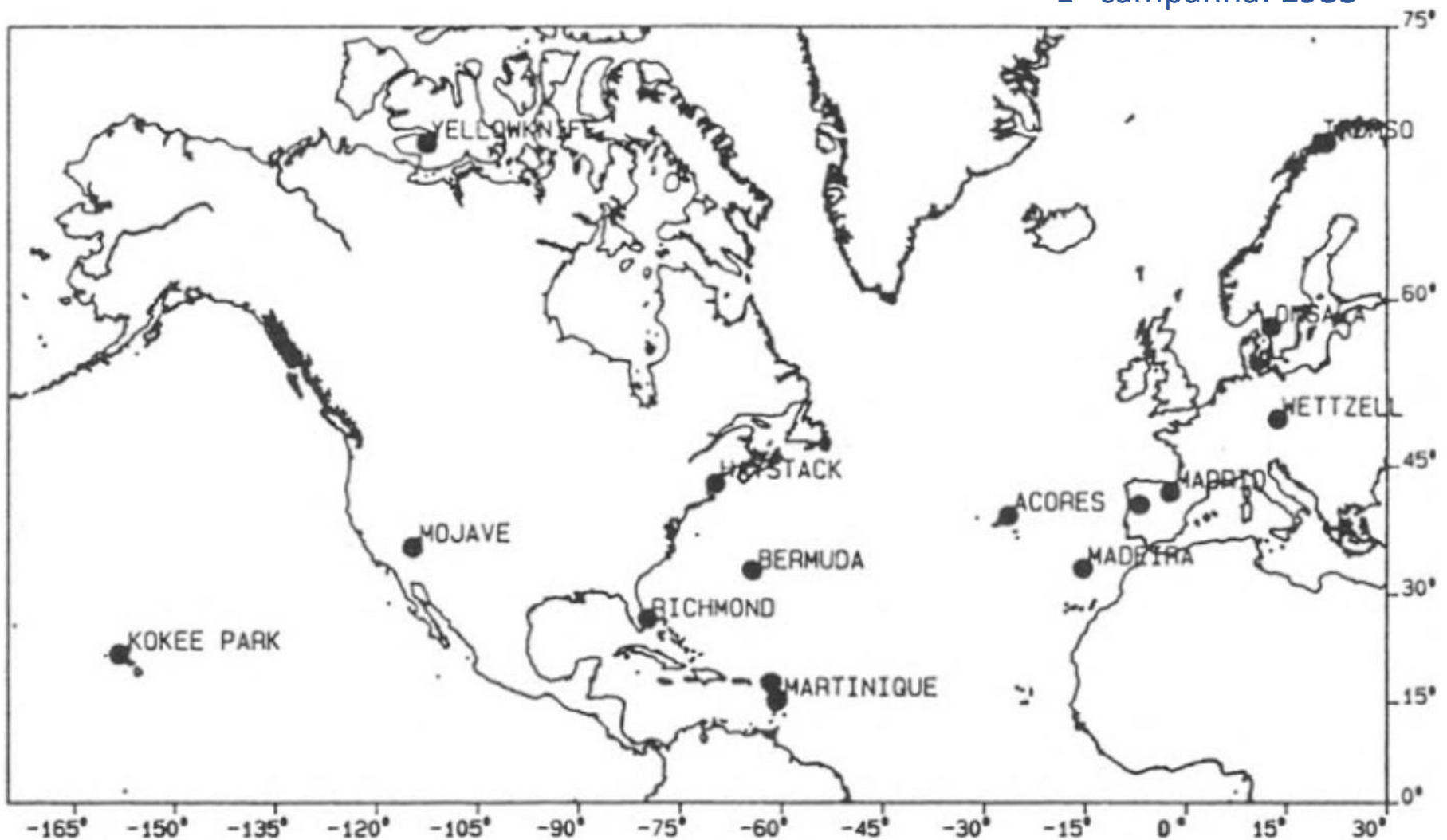
Rede TANGO

1ª campanha: 1988



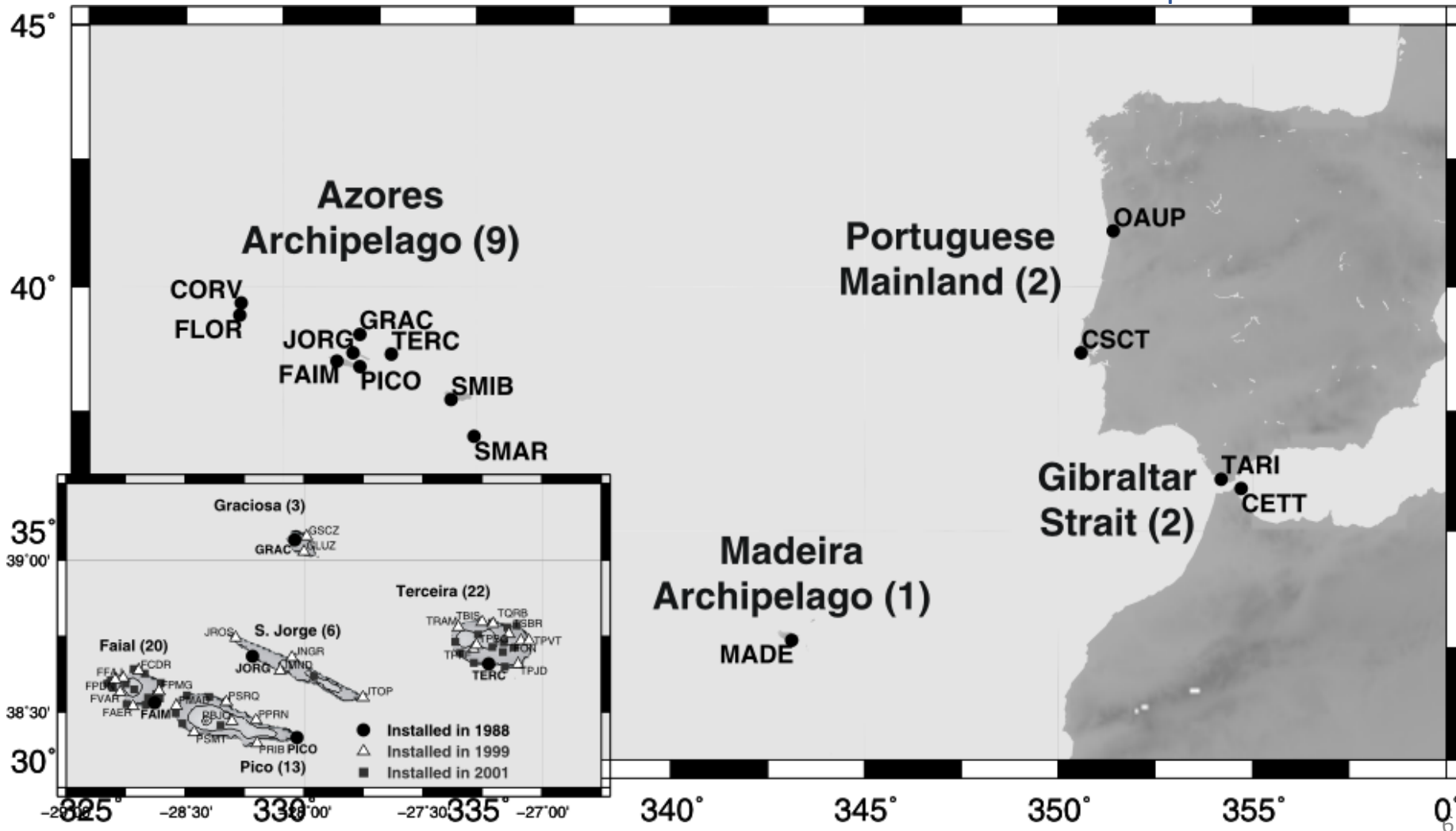
Rede TANGO

1ª campanha: 1988



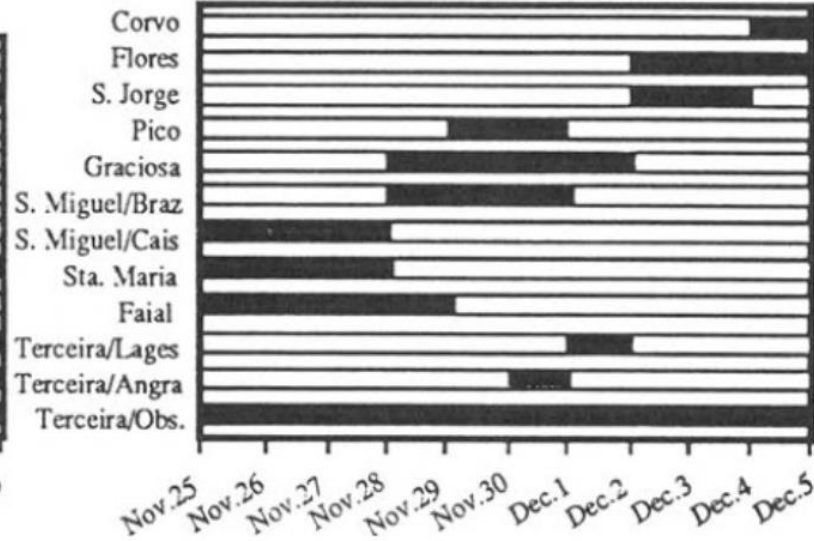
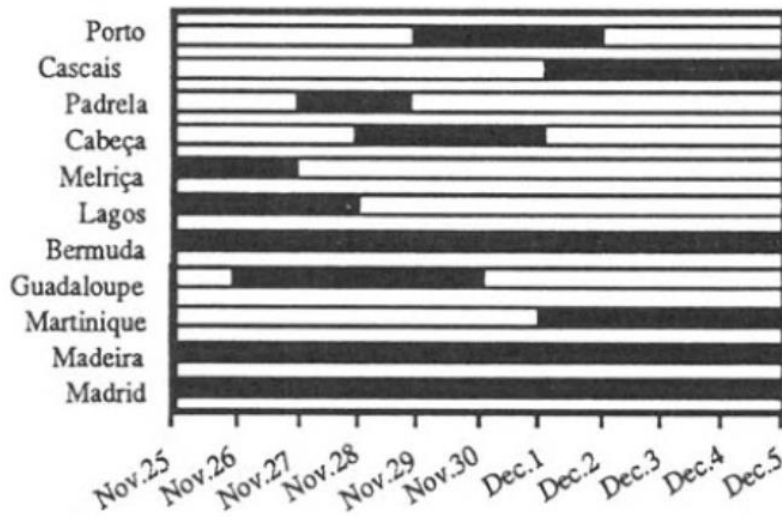
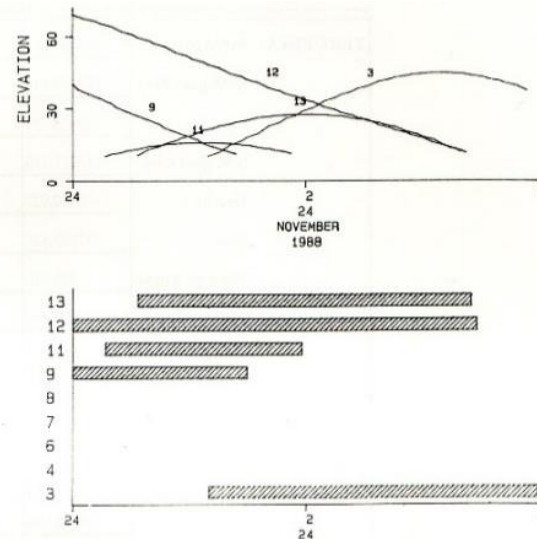
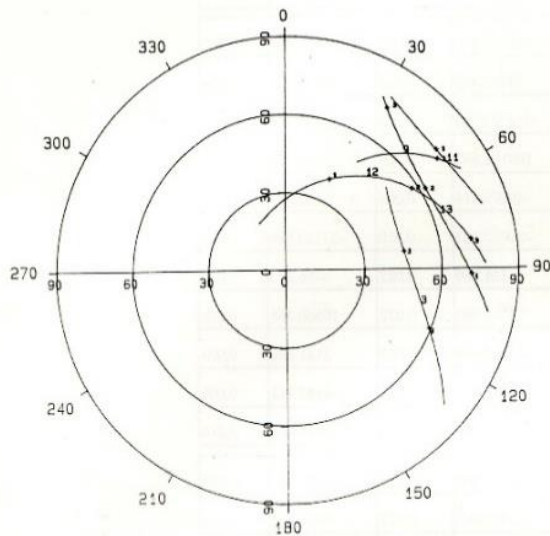
Rede TANGO

1ª campanha: 1988



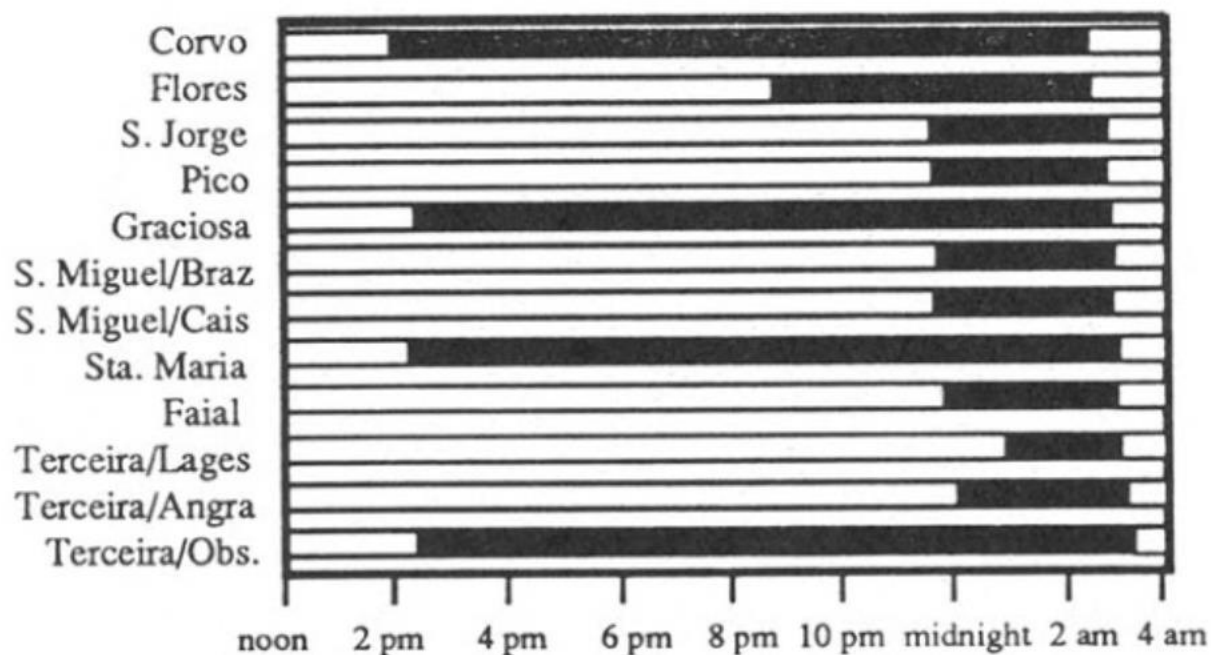
Campanhas TANGO

Visibilidade dos satélites NAVSTAR/GPS – um desafio!



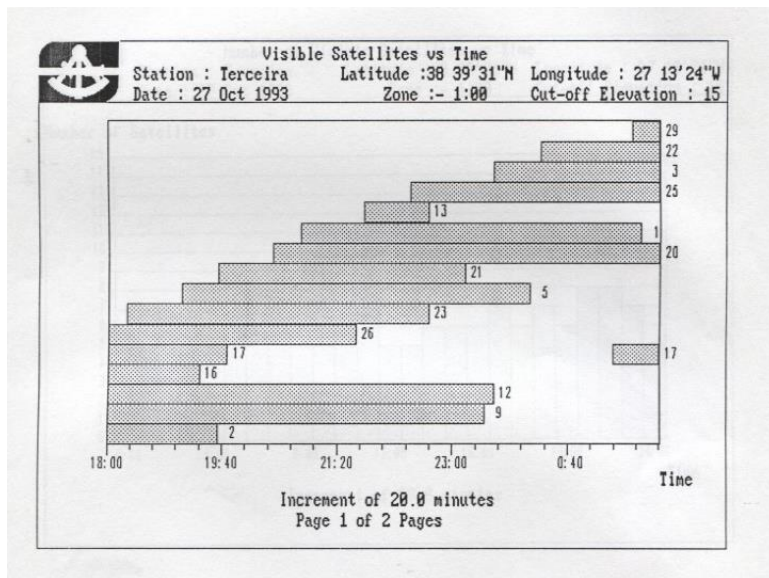
Campanhas TANGO

Visibilidade dos satélites NAVSTAR/GPS – um desafio!



Campanhas TANGO

Estação de referência na Ilha Terceira



Campanhas TANGO

Poucos satélites, janela de visibilidade limitada, locais remotos



Circle appropriate Antenna Type Include a sketch if the height was measured differently than shown.

Trimble 4000 SRT, SST, SZE Trimble 4000 SLD Ashtech XII



INSTITUTO GEOGRÁFICO E CADASTRAL
DIRECÇÃO DOS SERVIÇOS DE GEODÉSIA

LOCAL: Ilha da Formosa, Observatório Meteorológico, Sr. Alberto do Monico, Monte das Nogueiras

NOME DA ESTACÃO: MONTE DAS NOGUEIRAS

OPERADOR: A. Bauch / M. Nogueira Lisboa DATA: 25, 26, 27 e 28 de Novembro de 1988

ESBOÇO DA LOCALIZAÇÃO

ESBOÇO DO PILAR

ESBOÇO DA ORIENTAÇÃO DA BASE

Pilar Base

- 1 - C
- 2 - A
- 3 - B (pandurinho)

FIELD RECORD FOR THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM

Station: Faial / Mte. Nogueiras FAM Date: 26-NOV-88

Station-Coordinates Approximately
 $\phi = 38^{\circ}32'$
 $\lambda = 32^{\circ}22'$ $\sim 20^{\circ}$
 Height = M.O.M.
 Antenna-Height: $i = 0.028m$

Observer: BAUCH GPS-Week 463
 TI 4100 Serial number 840501070004 Day of year 334
 ? Time of Switch-on in the afternoon

Observation Time scheduled	Span actual	Configuration	Cassette Label	Cassette VAX
00:16	10:20	9 M 12 B	FAM1.01	here data
1:06	01:08	3 M 12 B	FAM1.02	FAM 330.711
3:16		END		

Time UTC	Humidity	Temperature	Pressure	Time UTC	Humidity	Temperature	Pressure
00:14.2	16.8	17.3	756				
12:56	16.8	17.4	756				

Remarks: Antennennulllinie nach Norden ausrichten ✓

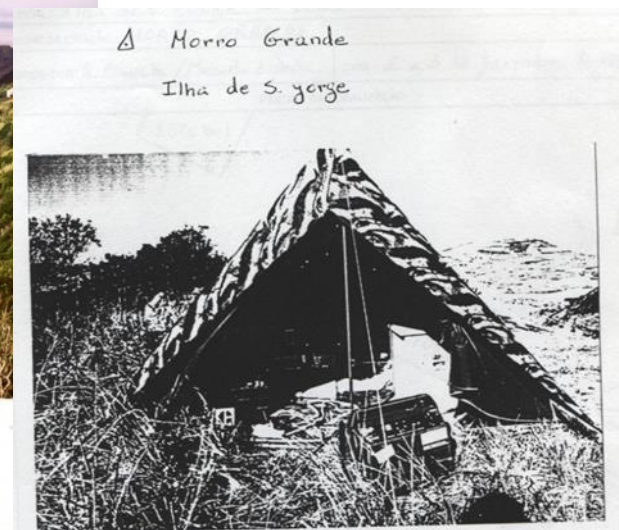
IN 840501070004
 SRT Number 415 126 ; System 12, Phase 2

Nach offenkundigem falschem Funktionieren mit #13 Neustart um 2:02 (UT) mit neuer Diskette in R, jetzt wieder normales Registrieren!

Nach dem monatlichen Wechsel der Diskette in R um 01:20 wurde die PC auf A um, der alte 20-Megabyte Diskette auf B übertragen, je nachdem, wo der Record "hockt".

Campanhas TANGO

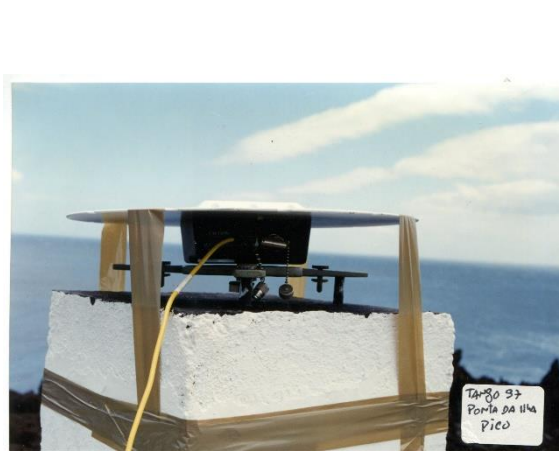
Acessos difíceis, más condições de observação e paisagens fantásticas



Tenda, emprestada pelo Regimento de Infantaria da Horta, utilizada na Ilha do Pico e na Ilha de S. Jorge.
Em 1º plano vê-se o Gerador e ao fundo da tenda o Receptor TI 4000.

Campanhas TANGO

Acessos difíceis, más condições de observação e paisagens fantásticas



Site Description

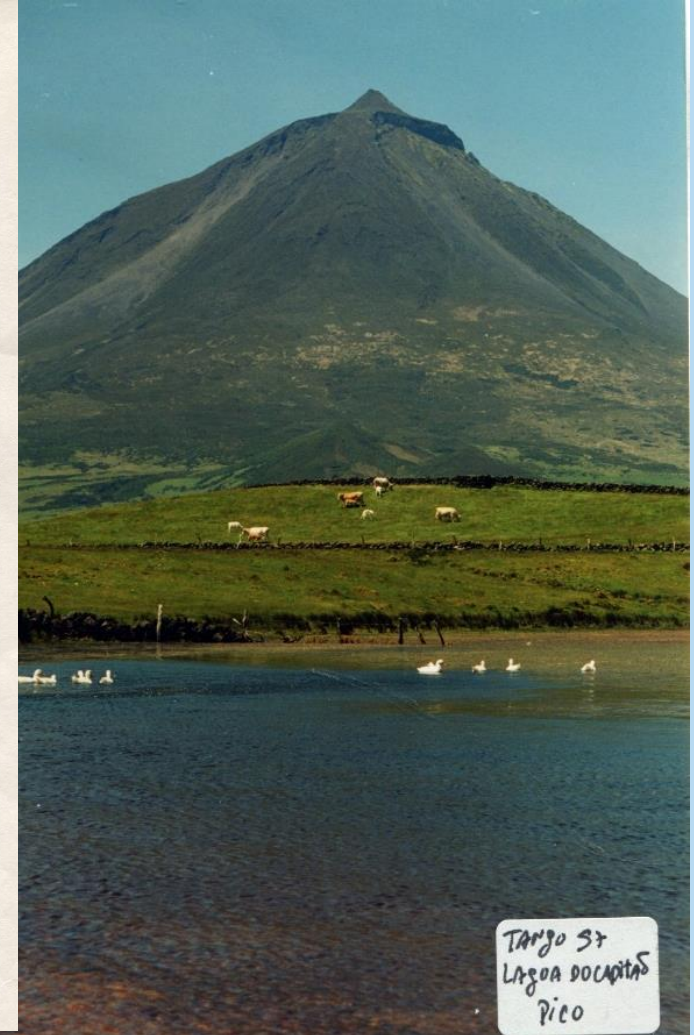
TANGO 2

Station Name Ponta da Ilha 3 Char ID PIC
Location Ponta Leste da Ilha do Pico
Operator José Alberto G. / Nuno Pereira
Institution Univ. Trás-os-Montes

Chart with location of station. Shortly describe the site and the way to reach it. Comment the station visibility above horizon.



Marco geodésico sobre uma rocha destacada no terreno, formada por rocha vulcânica. O acesso, a partir do farol, faz-se por um caminho de pé posto, bastante pedregoso, com cerca de 400 m. O marco não se vê do farol ao nível do chão.



Campanhas TANGO

Graciosa, Flores e Corvo



Attach a photo or a sketch of the observing monument.
Indicate the exact point where the instrument was centered
and include a North arrow.

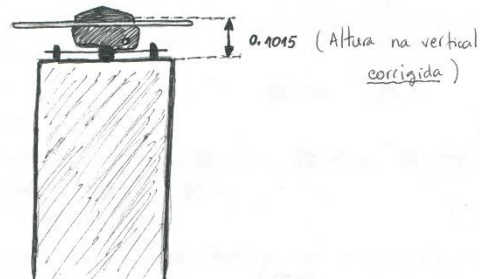
BASE SW - GRACIOSA

CASA PARTICULAR ONDE SE
FOI BUSCAR ELETRICIDADE
DE.



Antenna Type:

Include a sketch showing how the height was measured.



Campanhas TANGO

Oportunidade para desenvolver capacidades artísticas...

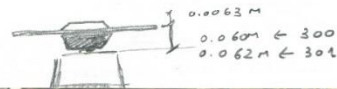


Circle appropriate Antenna Type Include a sketch if the height was measured differently than shown.

Trimble 4000
SDT, SST, SSE

Trimble 4000
SLD

Ashtech XII



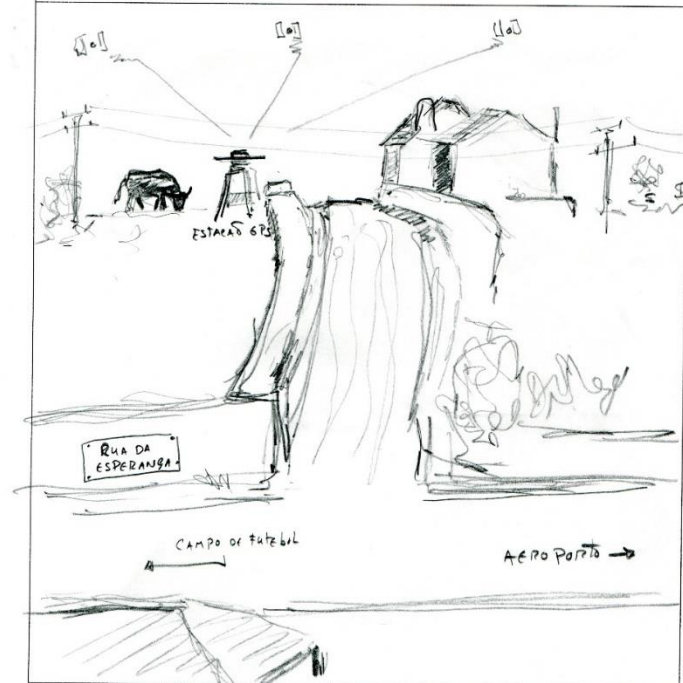
Site Description

AÇORES 3

Station Name AEROPORTO/FLORES 4 Char ID FLO3
Location AEROPORTO SIA CRUZ / ILHA DAS FLORES
Operator CLARA LAZARD Station ID #
Institution NUNO LIMA
UNIVERSIDADE DO PORTO E IICT

Chart with location of station. Shortly describe the site and the way to reach it. Comment the station visibility above horizon.

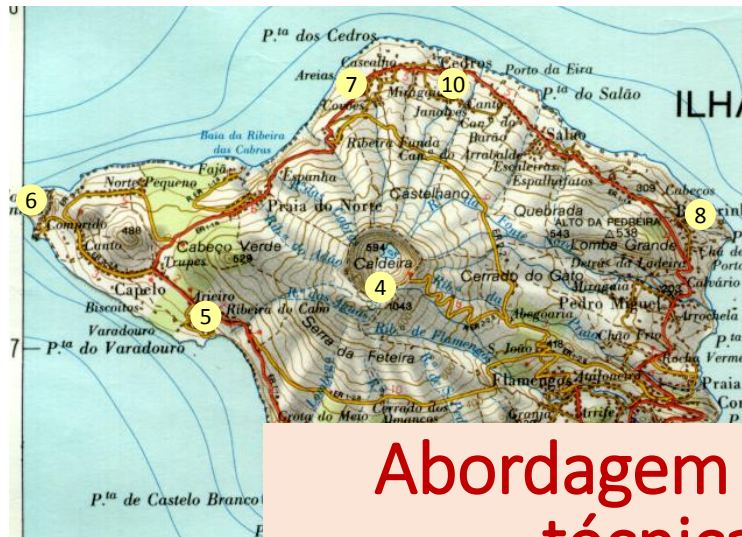
A SUDESTE DA ESTAÇÃO ENCONTRAM-SE DUAS CASAS QUE PODERÃO OBSTRUIR A VISIBILIDADE ATÉ 20° ACIMA DA ESTAÇÃO.



Campanhas TANGO

Gravimetria: Primeiras medidas absolutas nos Açores

- Estabelecimento da estação absoluta no Faial



Abordagem multi-técnica

Operador:		
Nome da Estação: Monte das Necessidades Estação absoluta		
Lat.	Long.	Alt.
		2

Esquema com a localização do ponto estacionado ou fotografia
Explicar acesso ao ponto <u>NOTA:</u> Tentativa de construção de uma estação absoluta no Observatório (Monte das Necessidades). A ideia foi, logo de seguida, abandonada e tudo o que foi feito foi destruído. A estação absoluta actual está no local já existente.



Campanhas TANGO

1988 - 1994

264

L. Bastos et al. / Tectonophysics 294 (1998) 261–269

Table 1
Summary of the main GPS campaigns

Stations		1988		1991		1993		1994	
Area	point/island	days	hours	days	hours	days	hours	days	hours
Continent	Porto	3	3	6	8	4	6	6	14
	Cascais	4	3	6	4	4	6	6	14
	Lagos	3	3	6	8			6	14
Azores	St. Miguel	3	3	6	8	4	6	6	14
	Sta. Maria	3	3	5	8			6	14
	Terceira	10	12	5	8	3	6	6	14
	Graciosa	4	3	4	8			6	14
	S. Jorge	2	3	4	8			6	14
	Pico	2	3	3	8			6	14
	Faial	4	3	3	8	4	6	6	14
	Flores	3	3	4	8	3	6	6	14
	Corvo	2	3	3	8			6	14
Madeira	Funchal	10	12	6	8			6	14
Strait of Gibraltar	Cadiz			5	8			6	14
	Ceuta			5	8			6	14
Canary	Maspalomas			5	8			6	14
	Lanzarote			5	8			6	14
	Hierro			5	8			6	14
	La Palma			5	8			6	14
Caribbean	Martinique	4	12					6	14
	Guadeloupe	4	12					6	14

Campanhas TANGO

Resultados iniciais

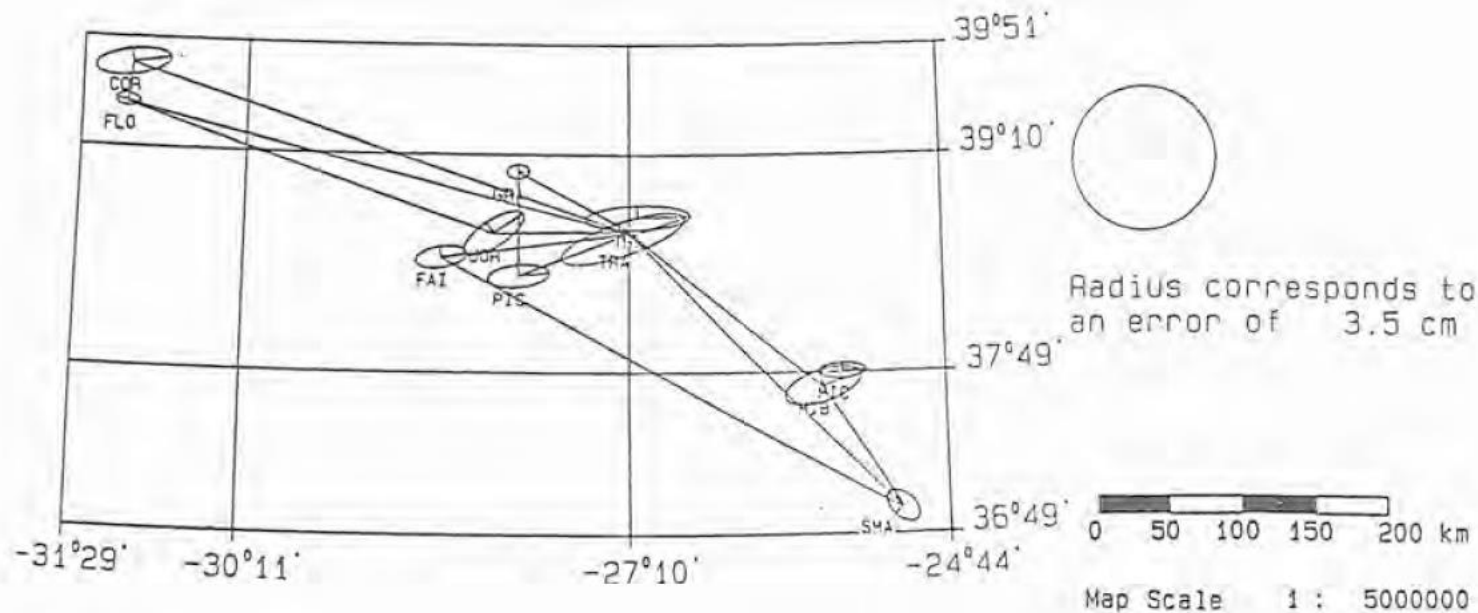


Table 2. Preliminary results with broadcast ephemeris.

Baseline from Westford to	Day	Distance [m]	Scale Difference to day 338 [ppm]
Bermuda	332	No data in Westford	
"	333	1282210.764	-0.3432
"	334	Sat 6 unhealthy	
"	335	1282211.089	-0.0897
"	336	11.023	-0.1410
"	337	10.764	-0.3432
"	338	11.204	-
Martinique	336	3213913.809	-0.0772
"	337	12.900	-0.3581
"	338	14.051	-
After applying scale factor derived from Westford - Bermuda			
Martinique	336	3213914.256	-0.0640
"	337	14.002	-0.0152
"	338	14.051	-

Table 1. Standard deviations for adjusted positions in centimeters (Terceira was fixed).

Station	σ_{North}	σ_{East}	σ_{Height}
Terceira / Observatory	-	-	-
Terceirs / Angra	0.4	0.9	0.9
Terceira / Lages	0.7	2.6	1.8
S. Miguel / S. Braz	2.0	5.1	5.4
Pico / Porta da Ilha	1.8	5.0	5.0
Corvo	7.3	14.8	13.1
Flores	7.2	14.4	13.1
S. Miguel / Cais	1.6	4.5	4.8
S. Jorge	7.2	15.0	14.3
Sta. Maria	1.5	4.2	4.6
Graciosa	1.1	3.4	3.3
Faial	1.4	3.9	3.7

Campanhas TANGO

- 1988 – GPS
- 1991 – GPS
- 1992 – GPS e gravimetria (absoluta e relativa)
 - Estação VLBI móvel estabelecida em S. Miguel
- 1993 – GPS
- 1994 – GPS e gravimetria (absoluta e relativa)
- 1997 – GPS e gravimetria (absoluta e relativa)
- 1999 – Início da mudança de estações ocasionais para estações permanentes.

Colaborações Institucionais

- Portugal

- Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
- **Instituto Português de Cartografia e Cadastro**
- Força Aérea Portuguesa
- Secretaria Regional de Habitação e Equipamentos
- Observatório Meteorológico José Agostinho, Terceira
- Observatório Meteorológico Príncipe Alberto do Mónaco, Faial
- Observatório Meteorológico Afonso Chaves, S. Miguel
- Universidade dos Açores
- Câmara Municipal de Vila do Porto
- Câmara Municipal de Sta. Cruz das Flores

- Portugal (cont.)

- Instituto de Ciências da Terra e do Espaço
- Instituto de Investigação Científica Tropical
- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- Instituto Superior Técnico

- Germany

- University of the Federal Armed Forces
- Institute of Astronomy and Physical Geodesy, Technical University Munich
- BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

- Finland

- Finnish Geodetic Institute



Colaborações Institucionais

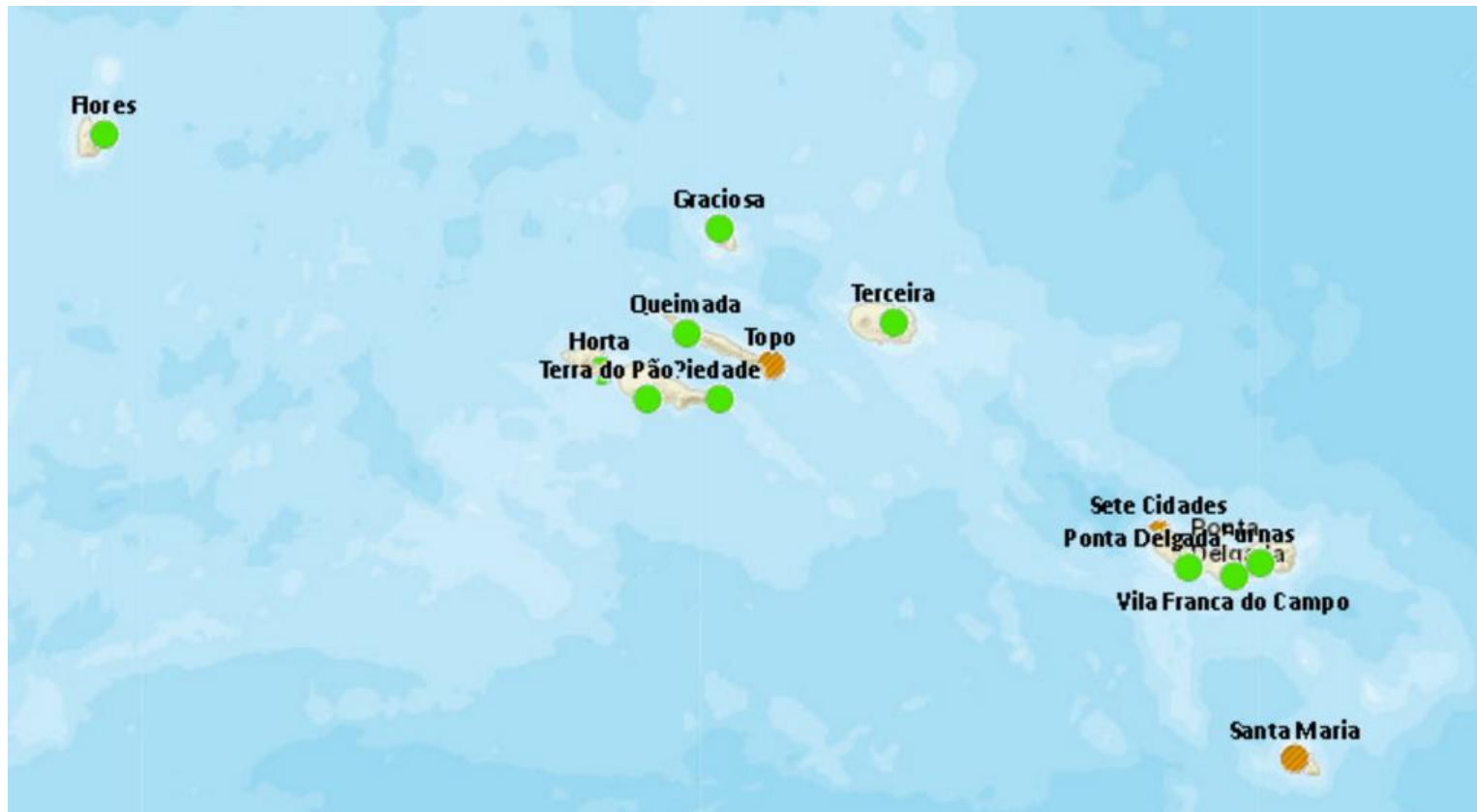
- Netherlands
 - University of Delft
- Austria
 - Austrian Academy of Sciences, Graz
- Spain
 - ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada)
 - IGN (Instituto Geográfico Nacional)
 - SGE (Servicio Geográfico del Ejército)
- Denmark
 - Kort-og-Matrikelstyrelsen
- France
 - IGN (Institut Géographique National)
- Switzerland
 - ETH (Eidgenössische Technische Hochschule)

Evolução da rede GPS nos Açores

- 1999 a 2001 - novos projetos complementares (Navarro et al., 2003; Fernandes et al., 2004) foram desenvolvidos, proporcionando uma melhor cobertura espacial, em particular no Grupo Central, com a **densificação da rede de estações** em cada ilha.
- Na década de 90 era já evidente que o objetivo de medir deformações horizontais com uma **precisão de 5 mm/ano** poderia em breve ser alcançado.
- Existência de registo de **mais de 20 anos de dados de campanhas GPS periódicas** na zona dos Açores.
- A partir de 1999 a rede GPS dos Açores começou a evoluir para **estações permanentes** (REPRAA, IVAR, FCUP, UBI...).

Estações permanentes actuais nos Açores

- REPRAA – 10 estações (brevemente 12)
- IVAR – 10 estações adicionais



Aumento de precisão

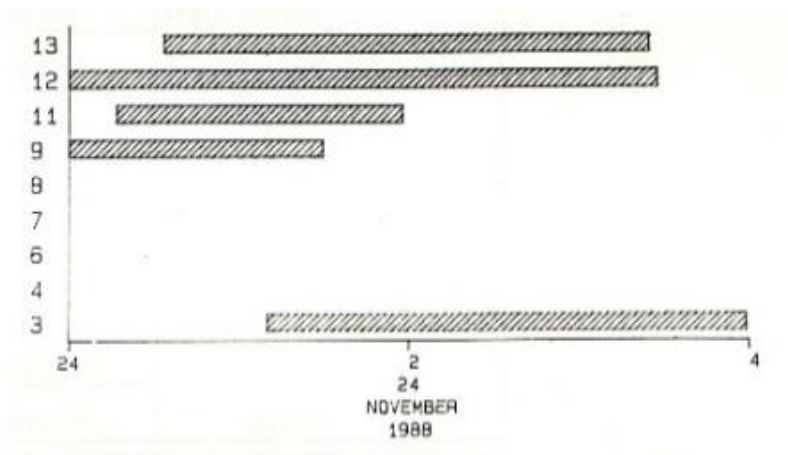
- No final da década de 90 assistimos a um aumento na precisão obtida com o **GPS** que passou **de centímetros para milímetros** nas soluções de posicionamento obtidas a partir das **redes permanentes** (posicionamento relativo usando medidas de fase).
- As metodologias de processamento mais utilizadas foram as Diferenças Duplas (**DD, Double Differences**) e as Diferenças Simples (**SD, Single Differences**).

Novas abordagens necessárias

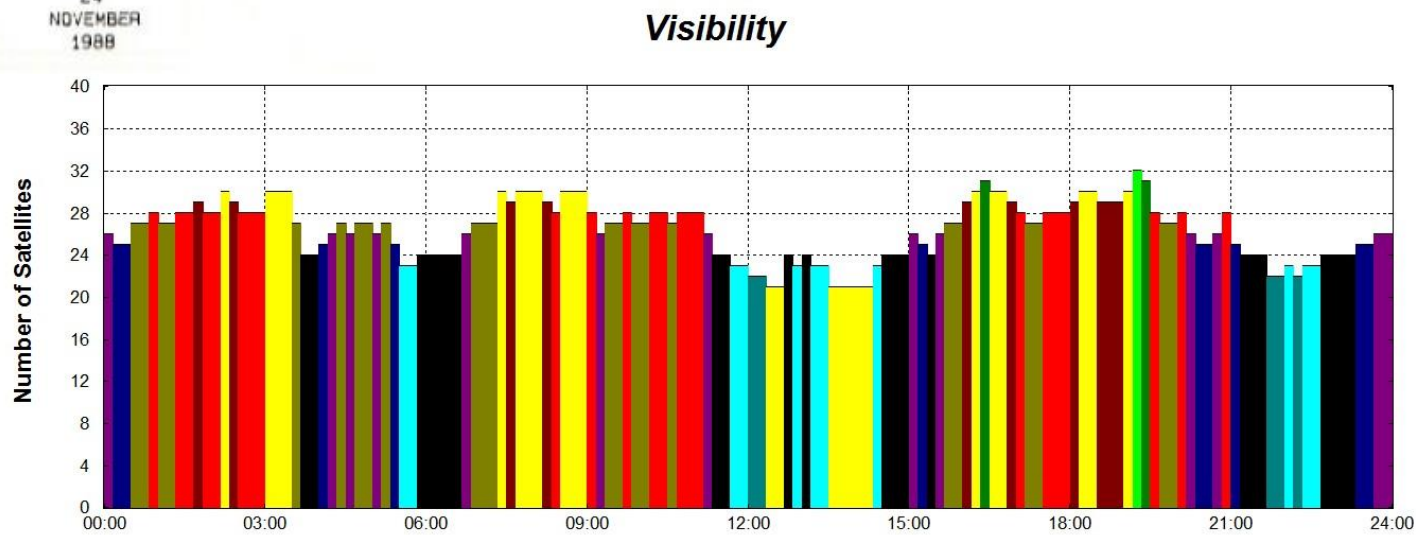
- Sistema de Referência
- Resolução da ambiguidade da fase
- Correções Geofísicas
 - Correções de maré
 - Expansão térmica
 - Ajuste isostático
- Análise das séries temporais
 - Sinais periódicos
 - Correlação temporal e espacial
 - Ruído: propriedades e correlação espacial
- Monumentação
- Órbitas
- Correção dos erros com origem na ionosfera e troposfera
- Os problemas de hardware tornaram-se também mais evidentes (variação do centro de fase da antena, bias dos canais, ...)

Resultados recentes

Melhoria na visibilidade dos satélites



Visibilidade dos satélites: 1988 e 2017



Station Near: Lajes Azores North 37° 50' West 27° 6' Height 0m
Satellites 54 GPS 31 Glonass 24 Galileo 13 Compass 14 WAAS 12 [almanac alm (23-06-2017)]

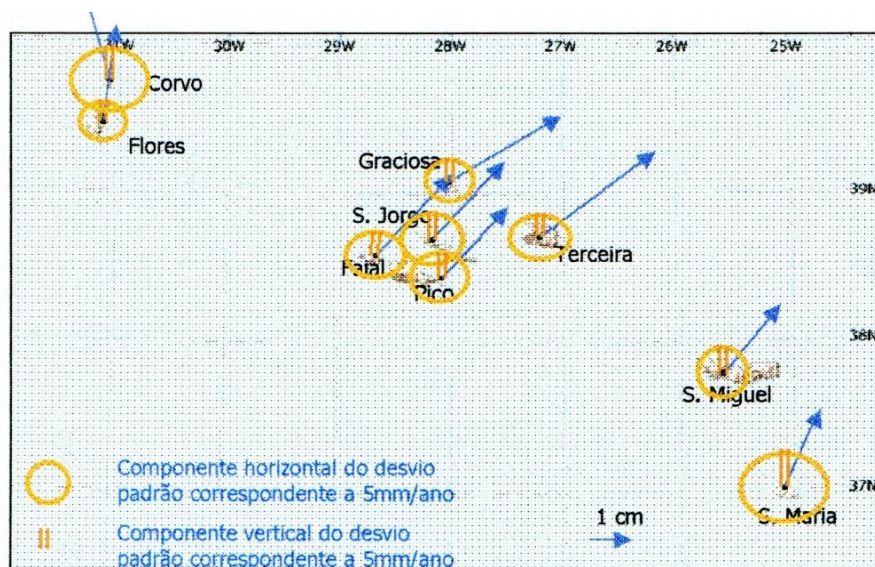
Elevation cutoff 0° Obstacles 0%

Time 23-06-2017 00:00 - 24-06-2017 00:00 (UTC+0.0h)

Resultados recentes

Direcção e intensidade do movimento idênticas

• 1998



• 2015

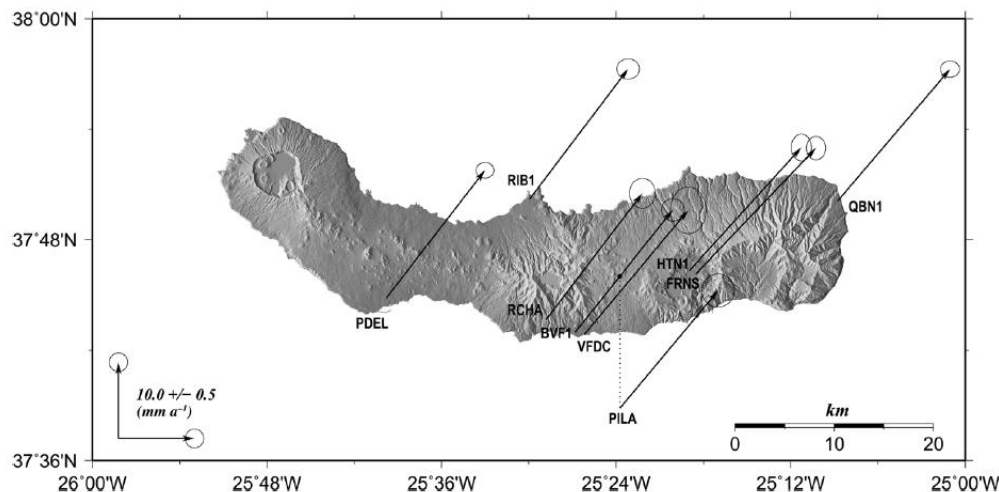


Fig. 18.5. ITRF2005 horizontal velocity field in São Miguel Island for the period of April 2008 to May 2013. The error ellipses represent 95% confidence intervals.

Tectonic and volcanic deformation at São Miguel Island, Azores, observed by continuous GPS analysis 2008–13

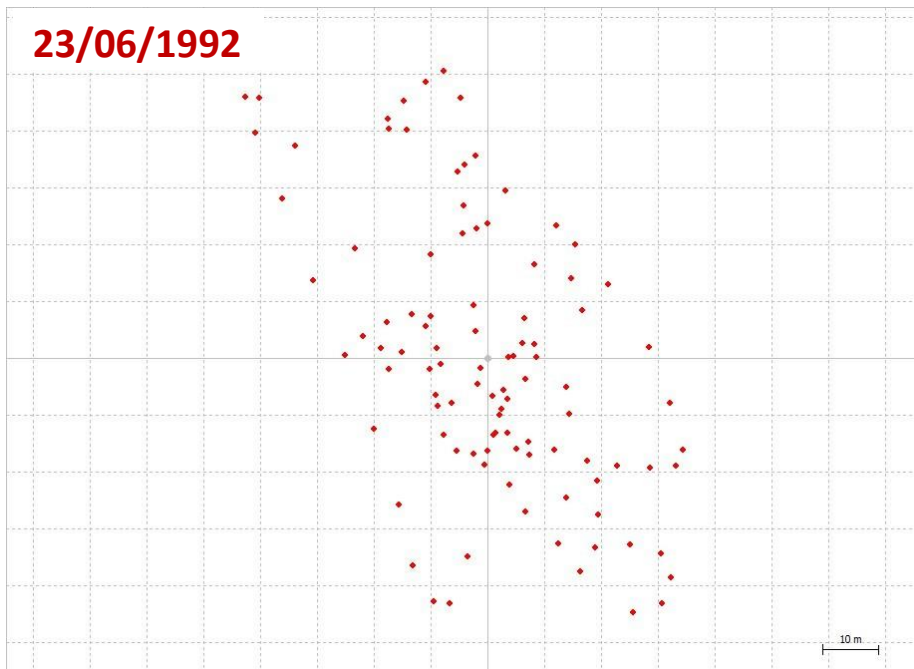
JUN OKADA^{1*}, FREYSTEINN SIGMUNDSSON², BENEDIKT G. ÓFEIGSSON³, TERESA J. L. FERREIRA¹ & RITA M. M. T. C. RODRIGUES⁴

Figure 4.1 Annual absolute velocities and standard deviation associated for the Azores Archipelago. It was used the GPS absolute position of the station.

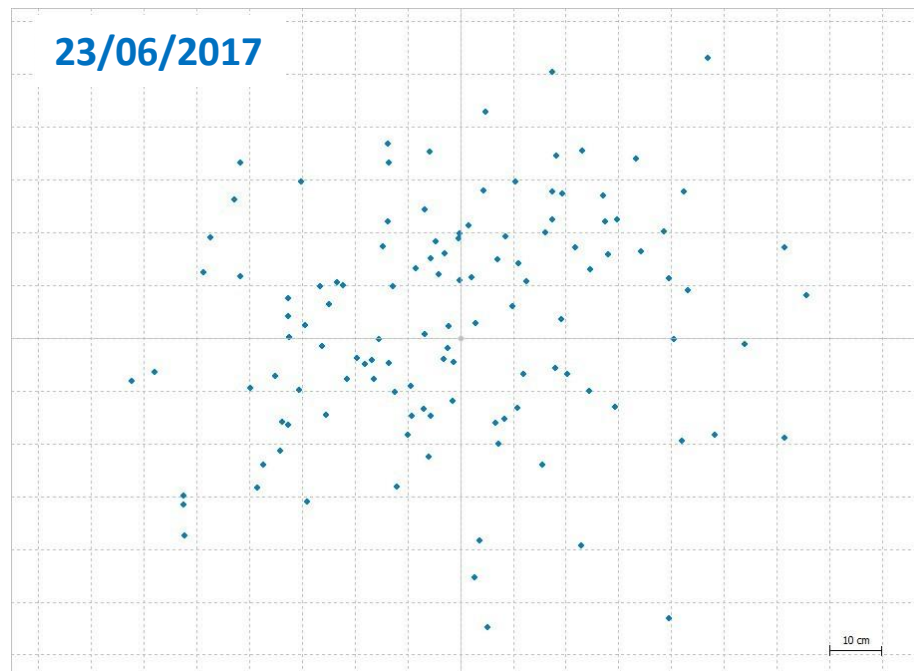
Resultados recentes

Novos algoritmos/abordagens PP (usando códigos)

23/06/1992



23/06/2017



Resultados recentes

Novos algoritmos/abordagens PPP

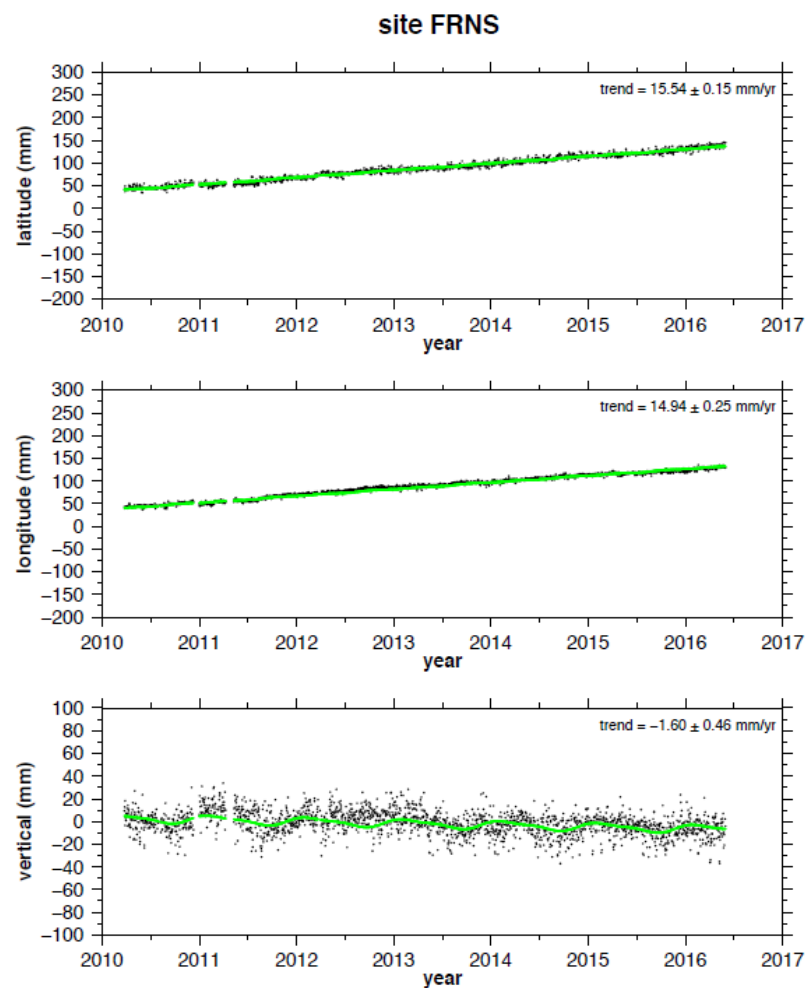
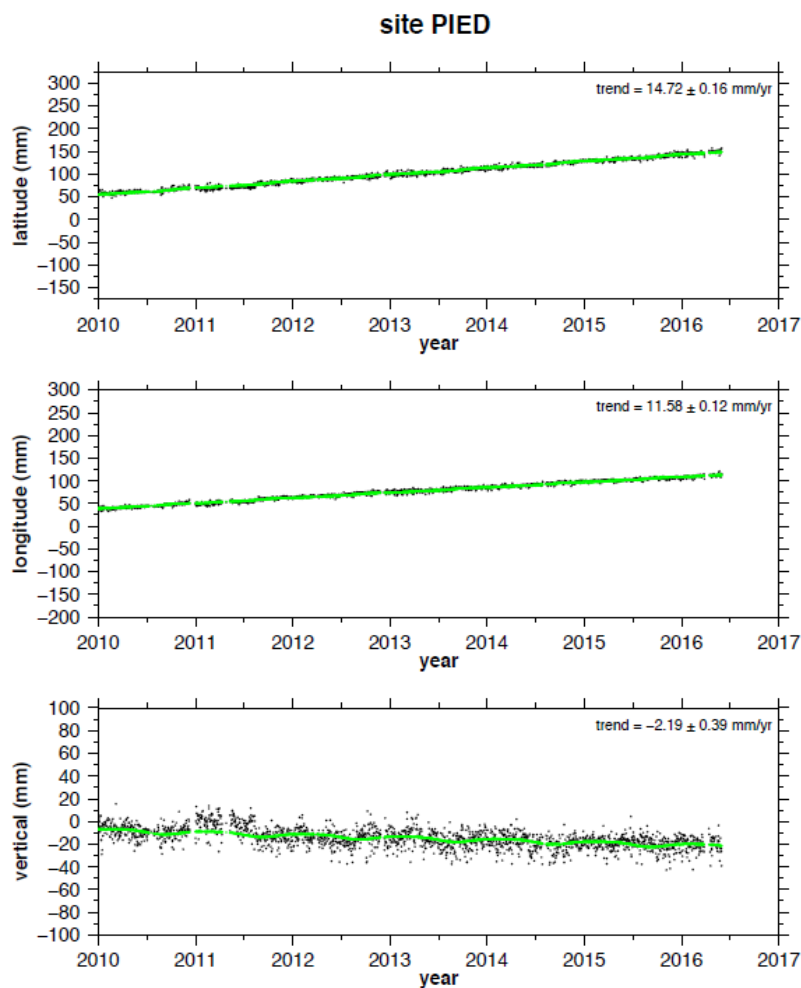
Station AZGR using RTKLIB (units: m)
(2016)

Results Days	Coordinates			Internal Precision		
	X	Y	Z	sigmaX	sigmaY	sigmaZ
007	4376062.7266	-2329042.1031	3999949.7214	0.0042	0.0038	0.0030
008	4376062.7166	-2329042.1028	3999949.7205	0.0038	0.0038	0.0028
009	4376062.7128	-2329042.1029	3999949.7252	0.0038	0.0035	0.0028

Resultados recentes (cortesia de Rui Fernandes)

Novos algoritmos/abordagens PPP

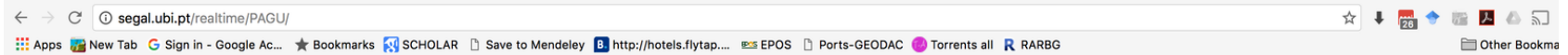
GIPSY PPP approach (SEGAL solution)



Resultados recentes (cortesia de Rui Fernandes)

Soluções precisas em tempo real

<http://segal.ubi.pt/realtime/PAGU/>



PAGU Station



Position

Latitude: 38.767311645°

Longitude: 332.815662727°

Ellipsoidal Height: 304.538 m

Displacement

East: 0.000 m

North: 0.004 m

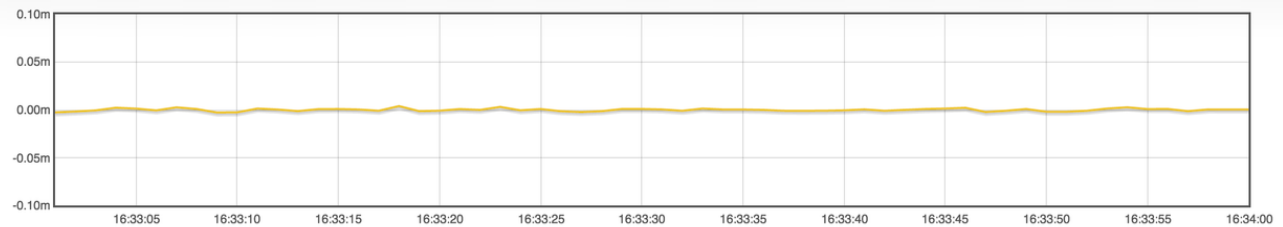
Vertical: -0.004 m

GPS Time

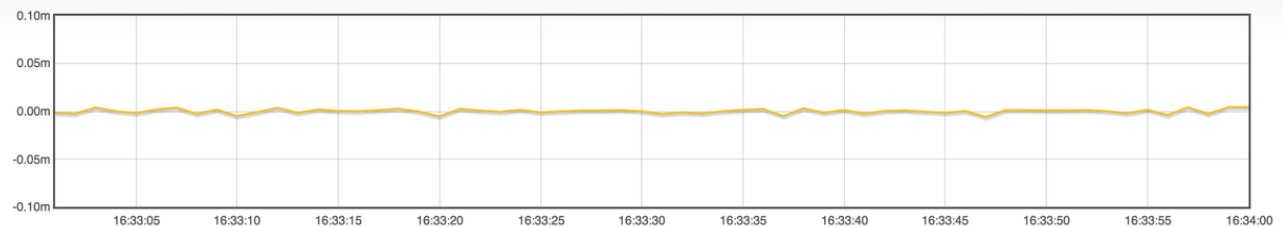
Clock: 12/09/2016 16:34:00.0

Alerts

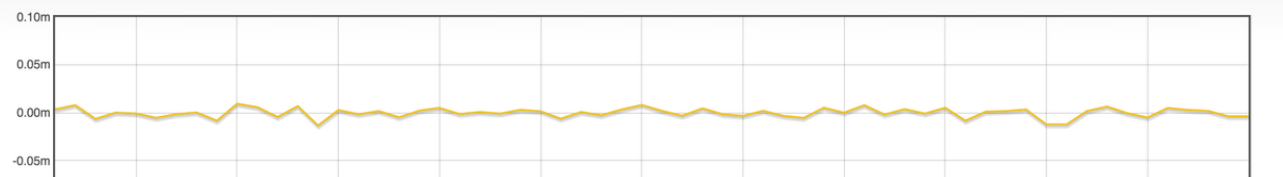
East



North



Vertical



Computed by

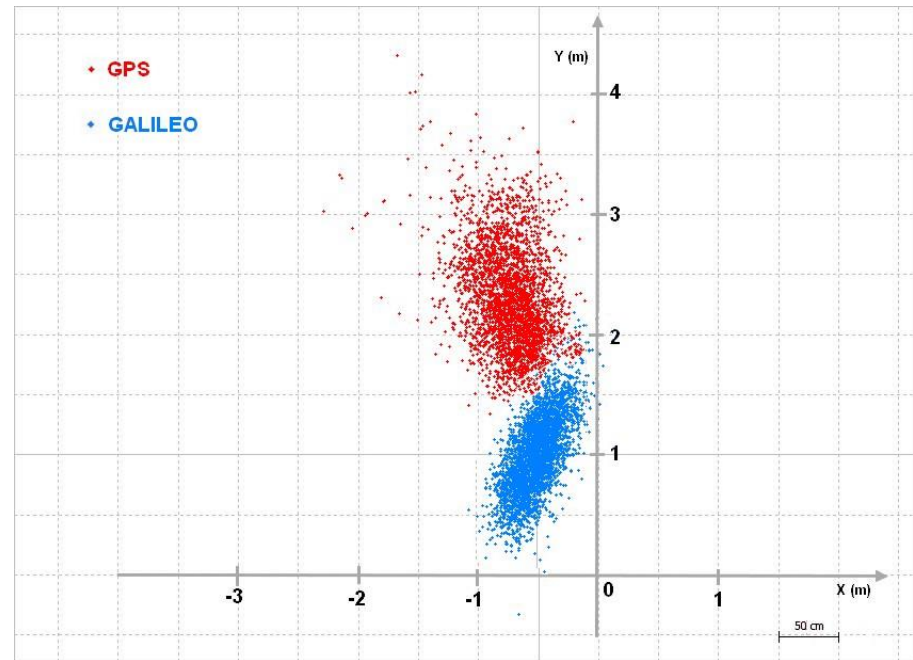
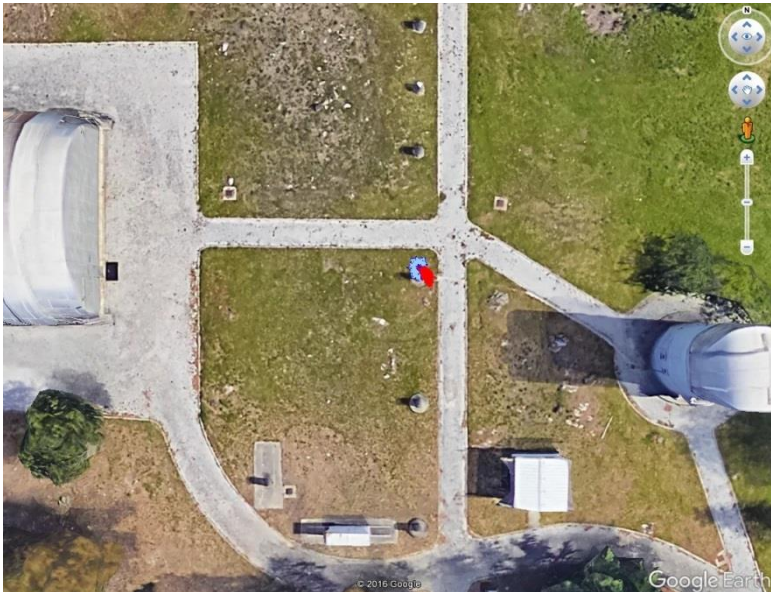


Provided by



Resultados recentes

Novos GNSS + Soluções PP (usando códigos)



- GPS (azul) e Galileo (vermelho)

Evolução

- Nas últimas 3 décadas houve muitos desenvolvimentos no estabelecimento de redes permanentes e nas metodologias de processamento.
- Na última década, a precisão **PPP** (Precise Point Positioning) melhorou **dos dm para os cm**.
- Actualmente, usando o **PPP**, é possível obter **precisões milimétricas** no processamento de observações das estações permanentes.

Processamento Multi-GNSS PPP (Guochang Xu, 2007)

Station AZGR (units: m)

Results Days	Coordinates			Internal Precision		
	X	Y	Z	sigmaX	sigmaY	sigmaZ
007	4376062.7175	-2329042.1007	3999949.7085	0.0028	0.0018	0.0024
008	4376062.7221	-2329042.0916	3999949.7135	0.0028	0.0018	0.0025
009	4376062.7202	-2329042.1054	3999949.7255	0.0028	0.0020	0.0024

Novas questões

- Passagem de redes a escalas globais e regionais para escalas locais
- Aumento das taxas de amostragem
- Redução de erros sistemáticos em frequências sísmicas
- Melhores modelos ionosféricos (que permitam lidar com efeitos de cintilação)
- Melhores modelos troposféricos (que permitam considerar os gradientes verticais e horizontais)
- Soluções precisas em tempo quase real (órbitas e relógios)
- Algoritmos de processamento multi-GNSS otimizados
- Bias inter-satélites
- Integração com outros sensors (acelerómetros, giróscopios, inclinómetros, etc.)
- Evolução para abordagens multi-técnica (GNSS, InSAR, imagem) e exploração de plataformas operadas remotamente (ex. UAV)



Mudança de paradigma

- As redes permanentes constituirão suporte fundamental para a obtenção de **órbitas mais precisas** e de **modelos de ionosfera e de troposfera melhores** e mais detalhados.
- A possibilidade de utilização de receptores multi-GNSS e multi-frequência de baixo custo contribuirá de forma decisiva para que um crescente número de utilizadores possa obter **soluções PPP muito precisas**.
- A melhoria na relação **custo/eficácia** do posicionamento preciso terá um **grande impacto nos utilizadores** e no modo como será feita a monitorização.

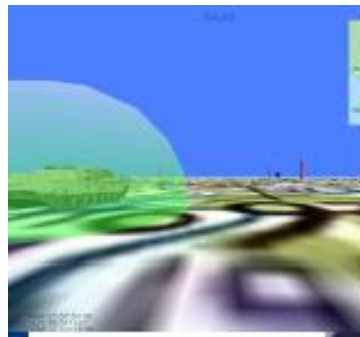
Novas oportunidades e desafios

- Evolução de sensores inteligentes e de nano escala (MEMS)



- Rápida evolução da conectividade de rede

- Novas técnicas de visualização

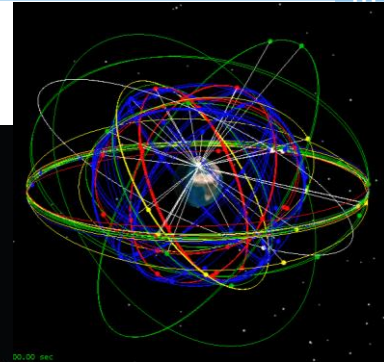
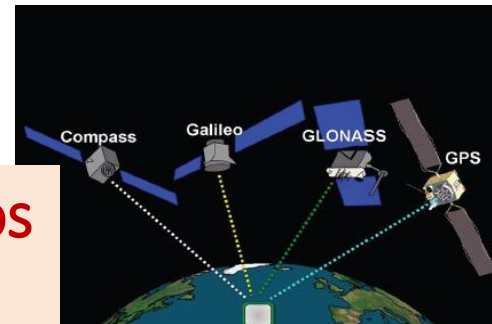


- Evolução de comunicações de banda larga e disponibilidade de dados.

Novas oportunidades e desafios

- Novos GNSS (mais de 100 satélites em 2020) e novos sinais

Integração de Sensores e dados
Multi-GNSS, Multi-sensor



- Novas plataformas e desenvolvimentos tecnológicos (UAVs, ASVs, maior capacidade de processamento, comunicações mais fáceis/rápidas/baratas na transferência de dados)





Perspectivas futuras

- Os sistemas GNSS contribuirão decisivamente para desvendar processos ligados aos fenómenos **sismotectónicos**, e também **meteorológicos**, constituindo um passo decisivo **na avaliação de risco**.
- **Serão disruptivos também em muitas outras aplicações.**
- Os desenvolvimentos, quer a nível tecnológico quer a nível de algoritmos de processamento, levarão ao aparecimento de **novas aplicações que dificilmente antecipamos.**



Um agradecimento especial às pessoas e instituições que apoiaram a implementação do Rede TANGO contribuindo para a exploração dos GNSS em Portugal

Obrigada pela vossa atenção!