UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA

Geodésia: Ciência de Observação das Mudanças Globais

Prof. Luiz Paulo Souto Fortes, PhD

1er Simposio Internacional de Geomática Aplicada y Soluciones Geoespaciales - GEODATA 2017

Rosario, 3 a 7 de abril de 2017

Programa

1. **Introdução:** O novo papel da Geodésia (1h30)
2. **Sistemas Geodésicos de Referência** (1h30)
   - 2.1 **Tridimensionais:** ICRS/ICRF, ITRS/ITRF e suas densificações regionais e nacionais
   - 2.2 **Verticais:** altitudes físicas e elipsoidais, superfícies de referência, sistemas nacionais, unificação de sistemas de altitude
3. **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS** (1h30)
4. **Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS):** fundamentos do posicionamento GNSS, planejamento de campanhas, redes geodésicas ativas, posicionamento pós-processado e em tempo real (relativo e PPP), posicionamento vertical com GNSS (3h)
5. **Outros Métodos Geodésicos Espaciais:** VLBI, SLR/LLR, DORIS, Altimetria e Gravimetria por Satélites (1h30)

Bibliografia

- DREWES, H. **From different spheres to the Global Geodetic Observing System**. IUGG GENERAL ASSEMBLY, Praga, 2015. http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/Drewes_2015_History_of_Geodesy_at_IUGG_General_Assembly.pdf
- FORTES, L. P. S. **Curso de Geodésia Básica**. UERJ, 2016
- FREITAS, S. R. C. DE. **Métodos baseados em Geodésia Espacial**. UFPR, 2013. http://www.cartografica.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2014/11/Aula-Métodos-Geodésicos-Cap-4-4.2.pdf
- HOFMANN-WELLENHOF, B., LITCHTENEGGER, H. AND COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. SpringerWienNewYork, 5th edition, 2001
- IBGE. **Geodésia**. http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default.shtm
- KAPLAN, E. D. (ed.) **Understanding GPS Principles and Applications**. Artech House, 1996
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. John Wiley and Sons, Inc., 2nd edition, 1995
- MARTÍNEZ, W., DREWES, H., BRUNINI, C., SÁNCHEZ, L. **Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia**. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2011
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS - Descrição, Fundamentos e Aplicações**. Editora UNESP, 2ª edição, 2008
- PARKINSON, B. W. AND SPILKER JR., J. J. (eds.) **Global Positioning System: Theory and Applications**. Volume I & II. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996

Bibliografia

- PETOVELLO, M. G. **Satellite Positioning. ENGO 465 Lecture Notes**. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Winter 2013. Adaptado para a UERJ por FORTES, L. P. S., 2015
- SÁNCHEZ, L. **Invitación a la realización del Sistema de Referencia Internacional de Alturas (IHRS) en la Región SIRGAS**. Reunión del Consejo Directivo de SIRGAS, Quito, 2016
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy Foundations, Methods, and Applications**. Walter de Gruyer, 1993
- SIRGAS. **Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas**. http://www.sirgas.org
- TAKASU, T. **RTKLIB ver. 2.4.2 Manual**. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf
- TORGE, W. **Geodesy – An Introduction.** Walter de Gruyter & Co. 1991
- TRIMBLE. **GNSS Planning Online**. http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/Settings
- VANICEK, P. **Report on Geocentric and Geodetic Datums**. University of New Brunswick, Fredericton, 1975. http://www2.unb.ca/gge/Pubs/TR32.pdf
- VANICEK, P.; E.J. KRAKIWSKY. **Geodesy: The Concepts**. Elsevier Science. 1996
- WELLS, D., BECK, N., DELIKARAOGLOU, D., KLEUSBERG, A., KRAVIWISKY, E.J., LACHAPELLE, G., LANGLEY, R., NAKIBOGLU, M., SCHWARZ, K.P., TRANQUILLA, J.M., AND VANÍCEK, P. **Guide to GPS Positioning**. Canadian GPS Associates, Fredericton, 1986

1. Introdução: O novo papel da Geodésia

- Geodésia – Conceito tradicional
- Impactos da evolução tecnológica na Geodésia
- Papel atual da Geodésia
- Situação da Geodésia no Brasil
- Perspectivas para a Geodésia do Brasil
- Considerações finais

Geodésia - Conceito tradicional

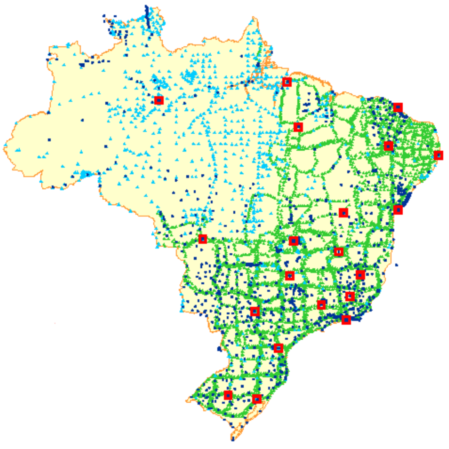
- Geodésia: ciência para medir e mapear a superfície da Terra (F. R. Helmert, 1880)
  - Neste conceito estão incluídos o campo externo da gravidade e a superfície submarina
  - Ramo tanto das Geociências quanto da Engenharia

  ⇒ Ciência que se ocupa da determinação da forma, das dimensões e do campo de gravidade da Terra
  - Subdivide-se em Geodésia Geométrica, Física e Espacial (ou por satélites)
- Também cobre outros corpos celestes - Selenodésia e Geodésia Planetária

Aplicação prática da Geodésia

Institutos Nacionais responsáveis pela Geodésia: implantação de redes geodésicas de referência para posicionamentos planimétricos e altimétricos

Em mais de 70 anos no Brasil... (ref: jan 2015)



Rede Plani(alti)métrica: **8.424** estações

Rede Altimétrica: **69.590** estações em **185.000 km** de linhas (9 voltas ao redor do planeta!)

(fonte: IBGE)

Evolução Tecnológica dos Últimos Tempos

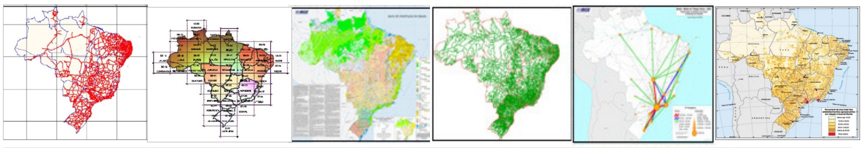
(fonte: Internet)

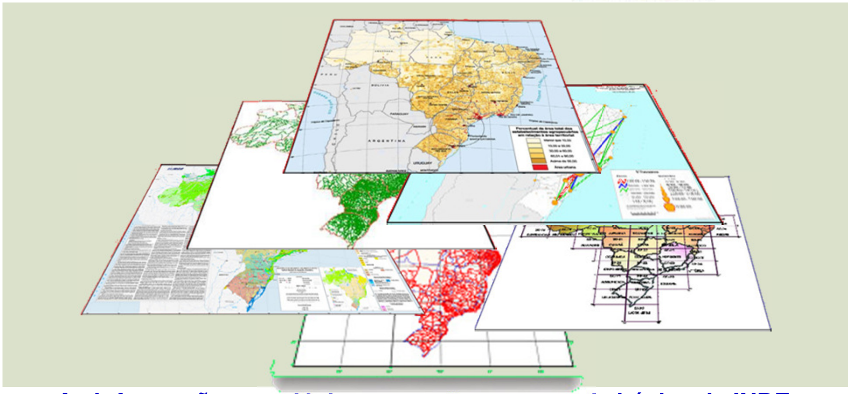
Evolução Tecnológica dos Últimos Tempos

(fonte: Internet)

Camadas de informação geoespacial

Geodesia	Cartografia	Recursos Naturais	Divisão Territorial	Geografia	Pesquisas Estatísticas

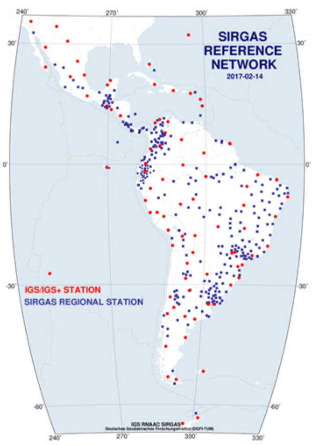


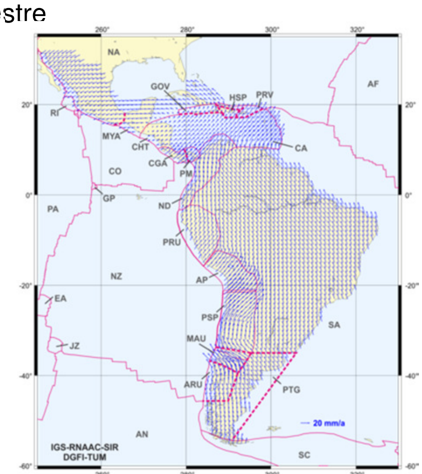


As informações geodésicas compõem a *camada* básica da INDE, fornecendo referência posicional a qualquer elemento do território

Impactos da Evolução Tecnológica na Geodésia

- Medições geodésicas cada vez mais precisas ⇒ detecção de variações de coordenadas com o tempo causadas, por exemplo, por deformações da crosta terrestre

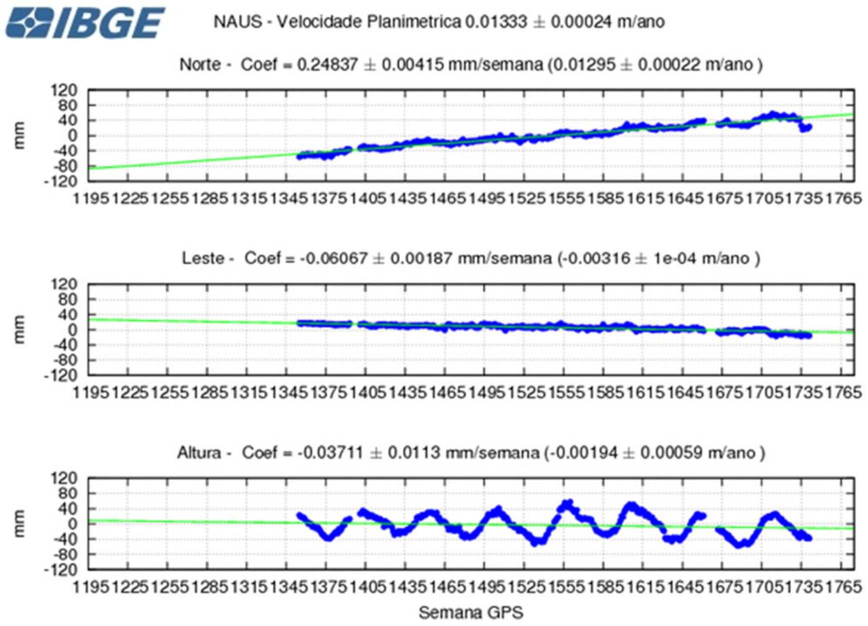




VEMOS2015 (Sánchez and Drewes 2016)

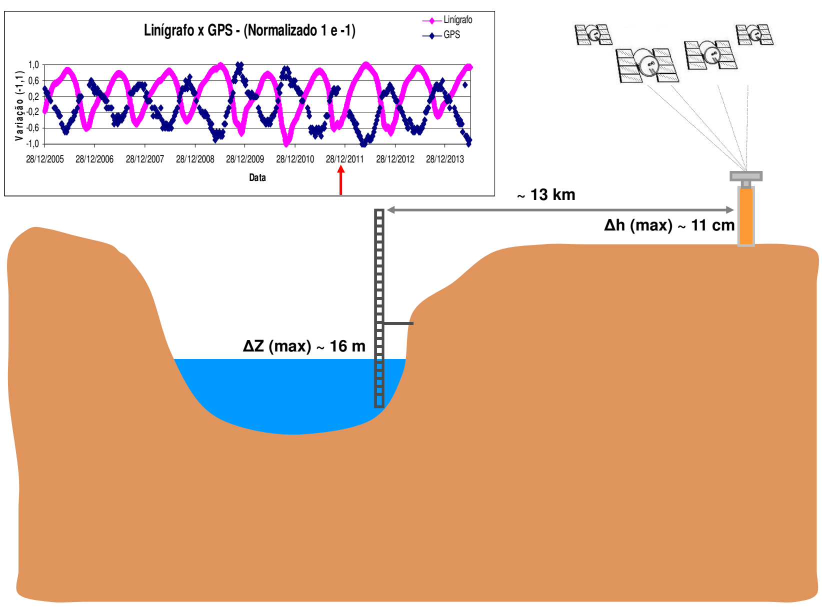
(fonte: SIRGAS)

Série temporal - NAUS (Manaus - Brasil)



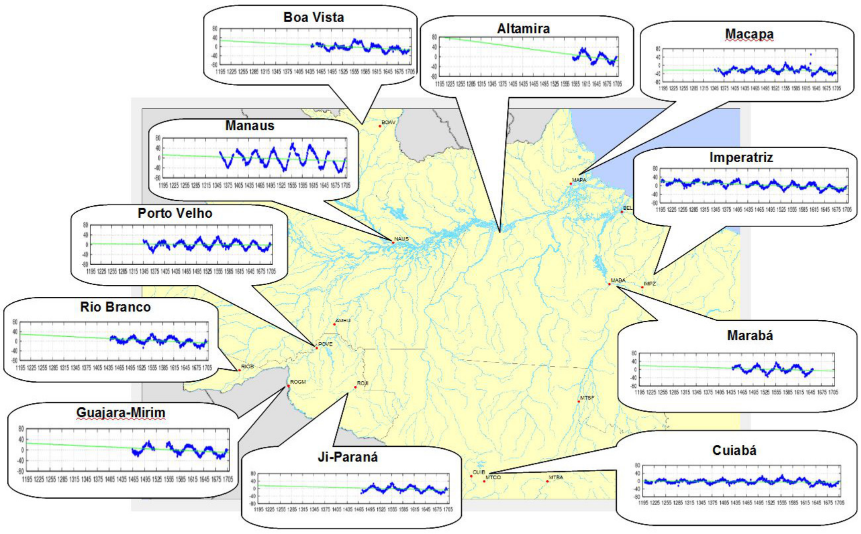
(fonte: IBGE)

Série temporal – altitude de NAUS x nível do Rio Negro



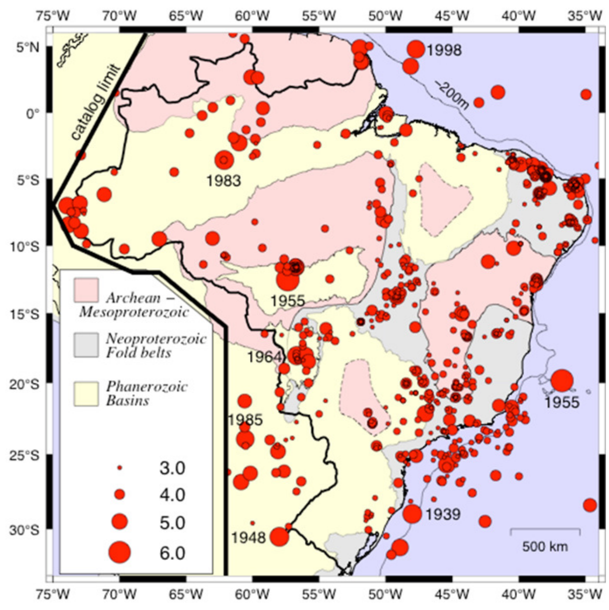
(fonte: Bevis et al. *Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response*. Geophysical Research Letters, Vol. 32, L16308, pp. 1-4, 2005)

Série temporal – altitude de estações da RBMC na Amazônia



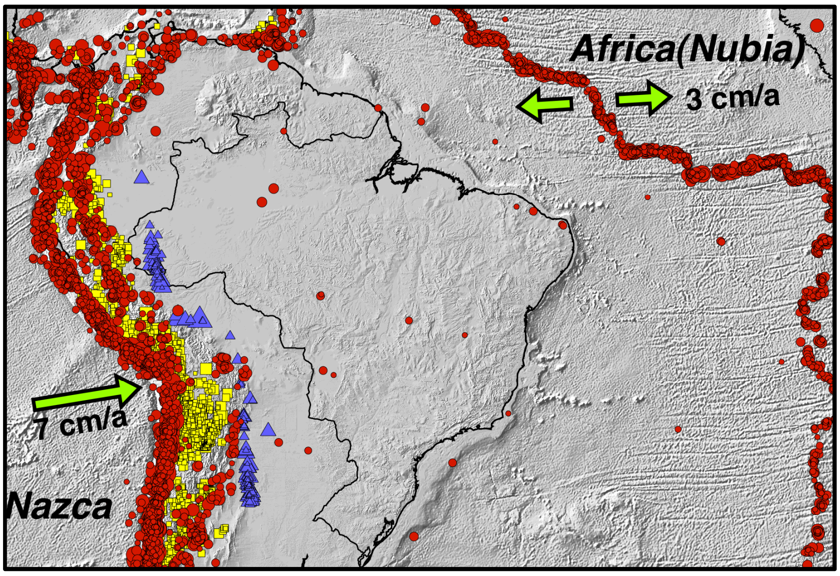
(fonte: IBGE)

Sismos no Brasil 1767-2012



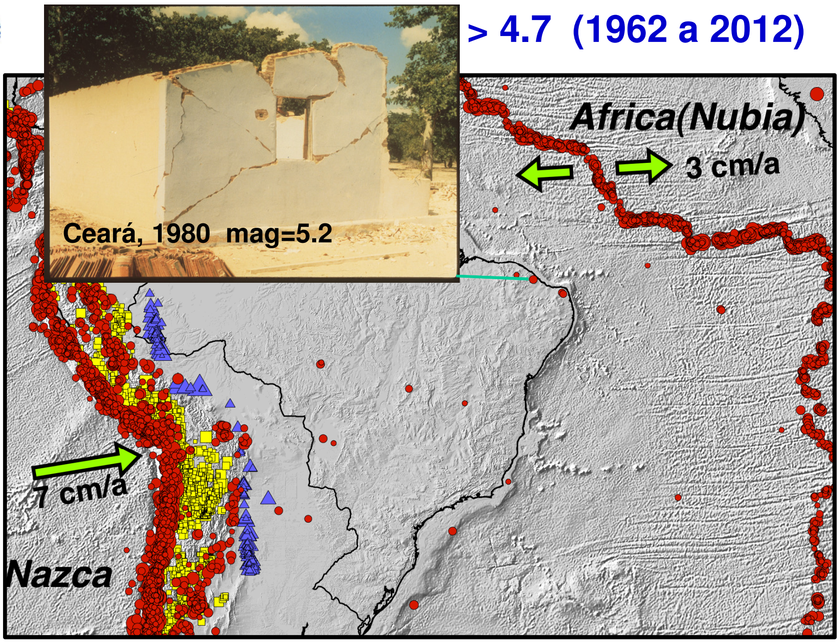
(fonte: Assumpção, M. Rede Sismográfica do Brasil)

Sismos de magnitude > 4.7 (1962 a 2012)

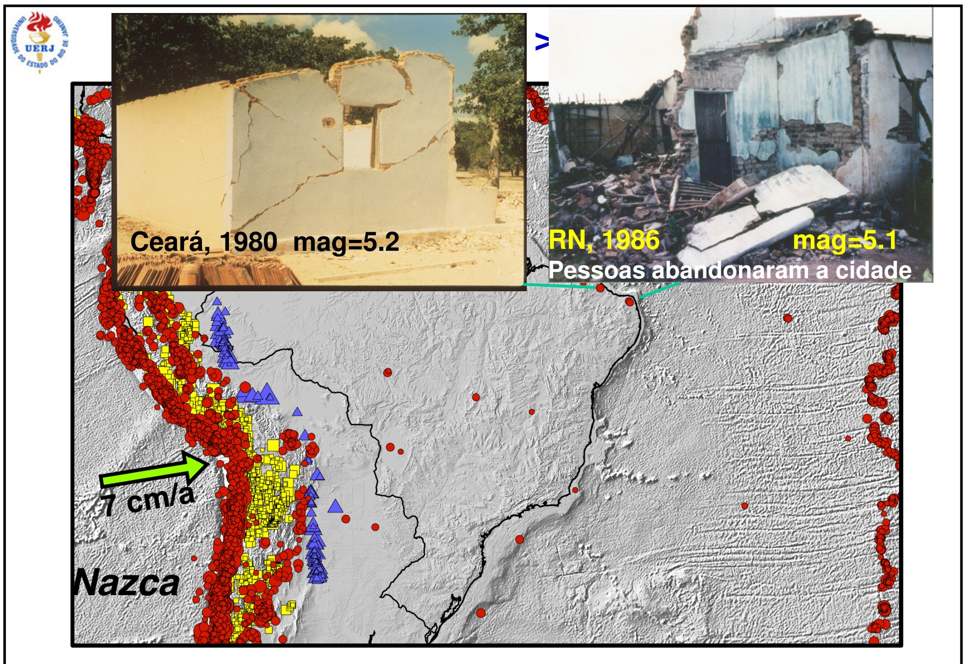


(fonte: Assumpção, M. Rede Sismográfica do Brasil)

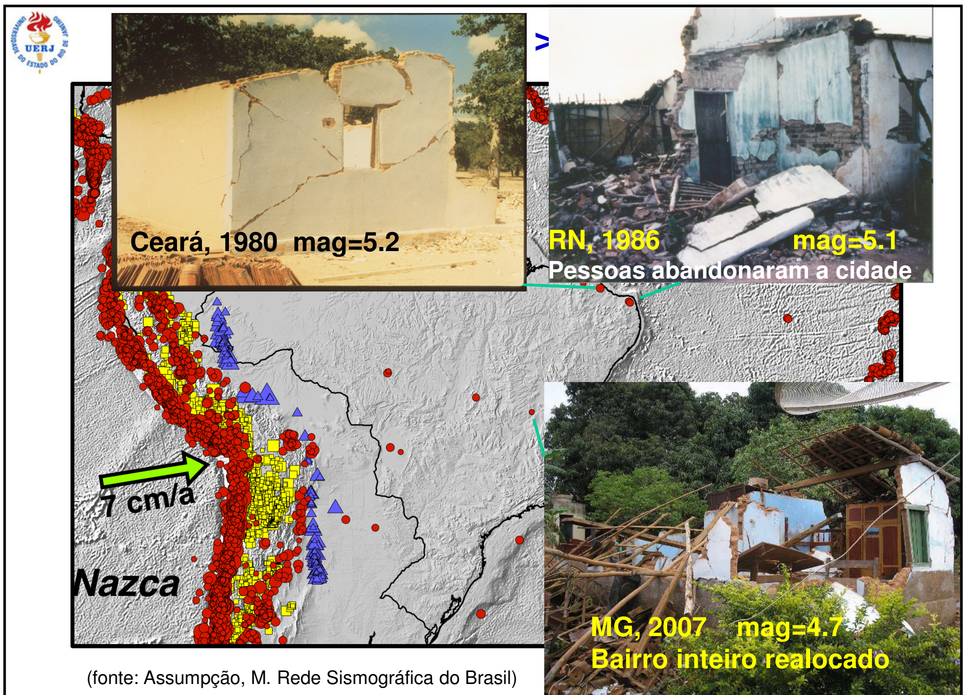
> 4.7 (1962 a 2012)



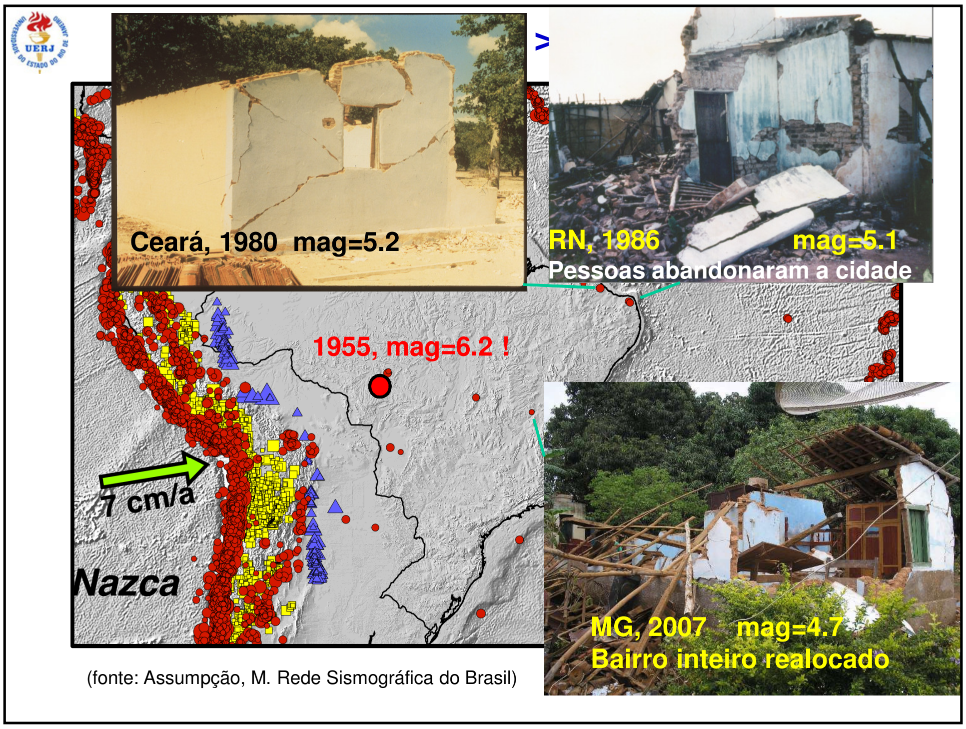
(fonte: Assumpção, M. Rede Sismográfica do Brasil)

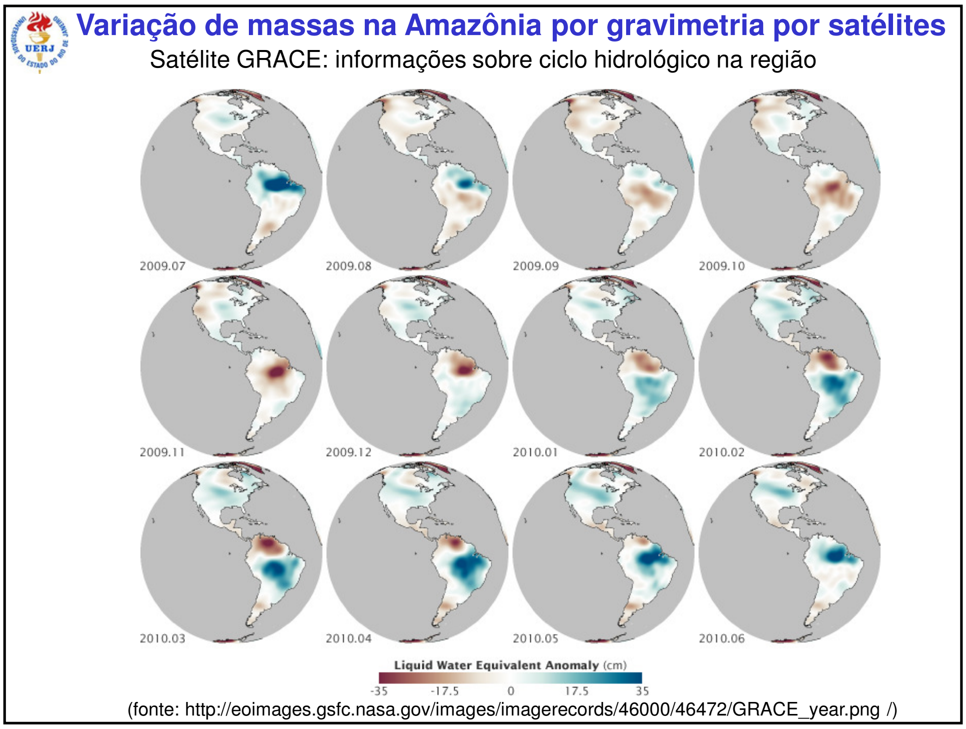


(fonte: Assumpção, M. Rede Sismográfica do Brasil)

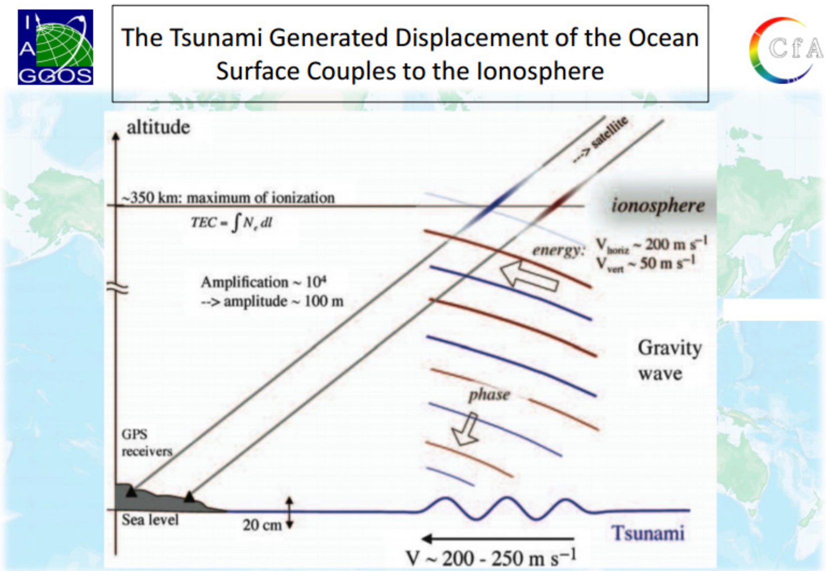


(fonte: Assumpção, M. Rede Sismográfica do Brasil)

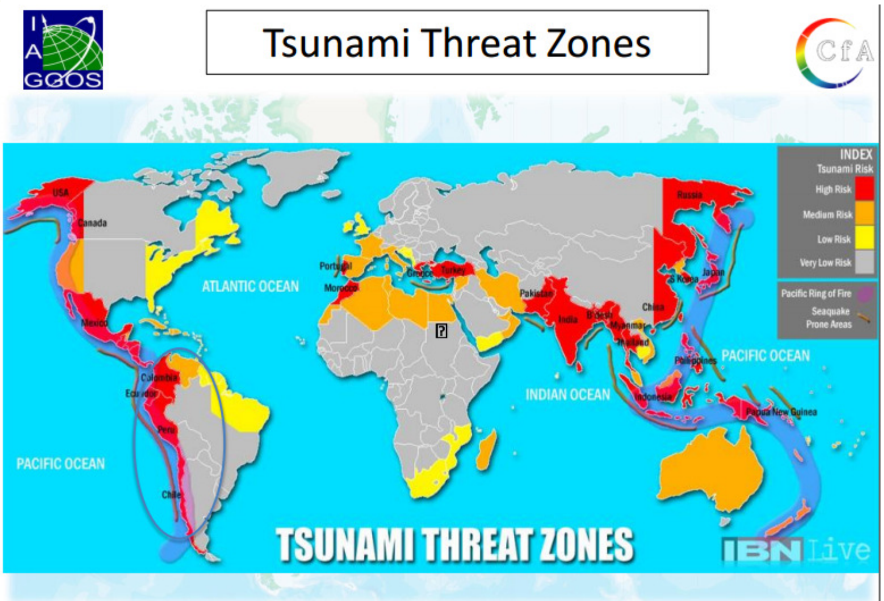

Ceará, 1980 mag=5.2
RN, 1986 mag=5.1
Pessoas abandonaram a cidade
1955, mag=6.2 !
7 cm/a
Nazca
MG, 2007 mag=4.7
Bairro inteiro realocado
(fonte: Assumpção, M. Rede Sismográfica do Brasil)


Variação de massas na Amazônia por gravimetria por satélites
Satélite GRACE: informações sobre ciclo hidrológico na região
2009.07
2009.08
2009.09
2009.10
2009.11
2009.12
2010.01
2010.02
2010.03
2010.04
2010.05
2010.06
Liquid Water Equivalent Anomaly (cm)
-35 -17.5 0 17.5 35
(fonte: http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/46000/46472/GRACE_year.png /)

Previsão e monitoramento de Tsunamis através de redes GNSS

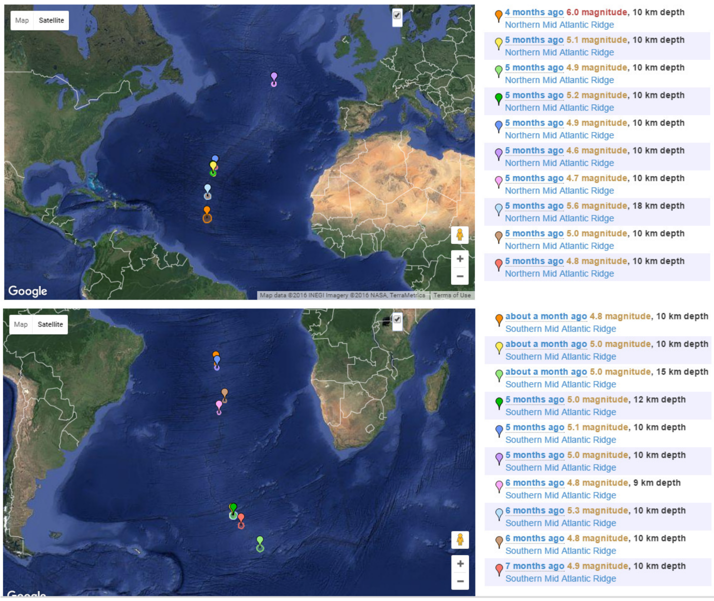


(fonte: Artru et al., 2005, apud Pearlman, 2015)



(fonte: Pearlman, 2015)

Terremotos recentes na dorsal mesoatlântica

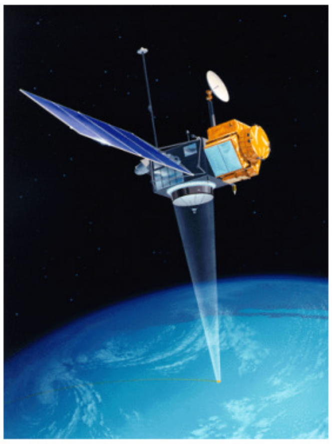


(fonte: http://earthquaketrack.com)

GNSS **A**ugmentation to **T**sunami **E**arly **W**arning Systems (GATEW)

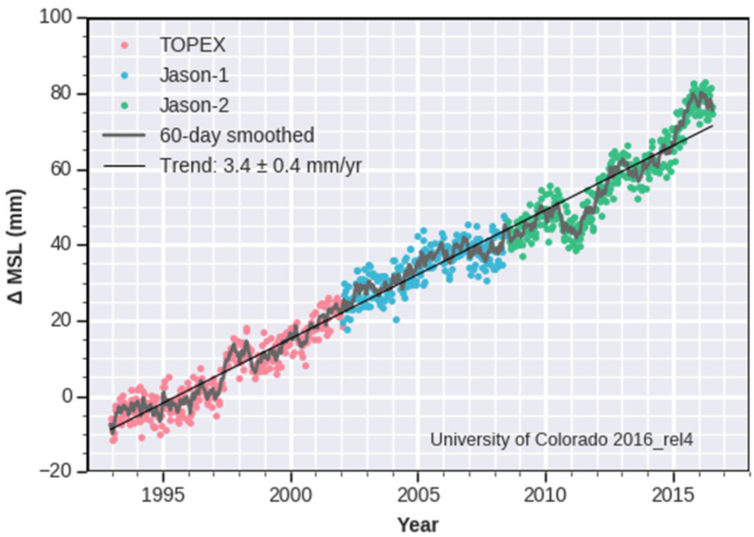
- Projeto no âmbito do IAG/GGOS, liderado pelo Dr. John LaBrecque
- Objetivo: definição de requisitos, identificação de recursos e incentivo à cooperação internacional para o estabelecimento, avanço e utilização do GNSS para alertas de tsunamis
- Rápida determinação da magnitude do terremoto crucial para definição da escala de tsunami
  - Métodos atuais: ~20 min
  - Métodos baseados no GNSS: potencial para 3 min!
- Distúrbios ionosféricos fornecem informações sobre a propagação do tsunami no oceano
- Chamada para participação em 2016, com respostas positivas de 10 países
  - Primeira reunião do grupo de trabalho em junho de 2017

Medição do nível médio dos oceanos por satélites



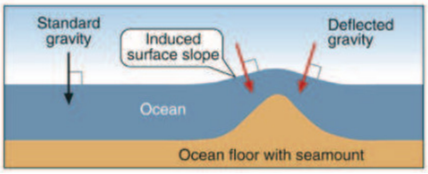
- A altimetria por satélites mede a distância entre um satélite e a superfície dos oceanos por radar
- Missões relevantes:
  - GFO
  - TOPEX/Poseidon
  - Jason 1/2
  - ENVISAT
  - SWOT (para 2020)
- Registro contínuo da variação do nível dos oceanos por um longo período de tempo

Variação do nível médio dos oceanos por altimetria por satélites



Potencialidades da altimetria por satélites: medição de feições significantes do relevo submarino

The Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT)



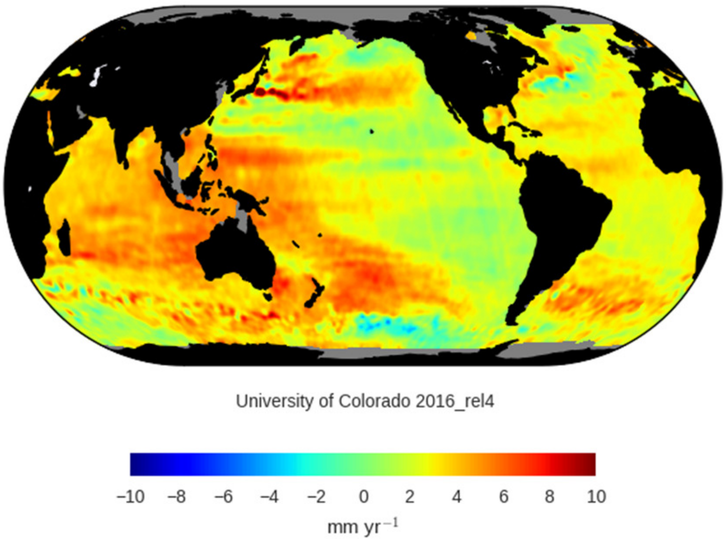
(fonte: Fu et al., 2012)

USS San Francisco crashed into 2-km tall uncharted seamount

- Los Angeles class nuclear submarine ran aground in route from Guam to Brisbane, Australia - 8 January, 2005
- One sailor killed, 115 injured
- Crash depth ~160 m, speed 33 kn, Sonar measured a depth of 2000 m 4 minutes before crash
- 30-hour trip back to Guam, crew managed to keep the sub from sinking

(fonte: Sandwell, 2010)

Variação do nível médio dos oceanos por altimetria por satélites (1993-2016)

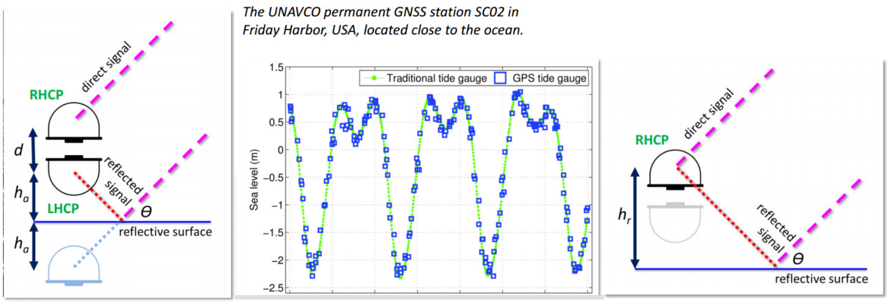


Medição do nível do mar por Reflectometria por GNSS

Exemplos de instalação:

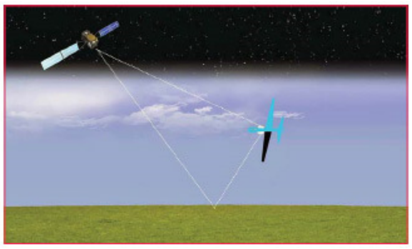
com **1 antena** ⇒

⇐ com **2 antenas**



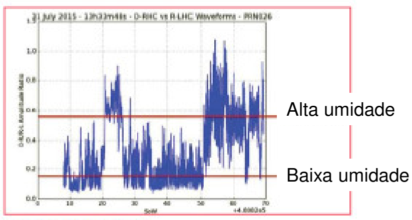
(fonte : Löfgren & Haas, 2014)

Medição da umidade do solo por Reflectometria por GNSS



- Comparação da **amplitude** ou do **SNR** do sinal direto com o do refletido para obter informações sobre a umidade do solo

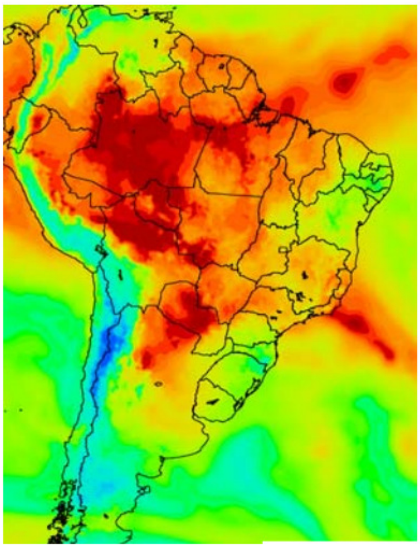
Antenas acima e abaixo da VANT



Refletividade da superfície - PRN26

(fonte : Van de Vyvere & Desenfans, 2016)

Estimativa do vapor d'água na atmosfera por GNSS



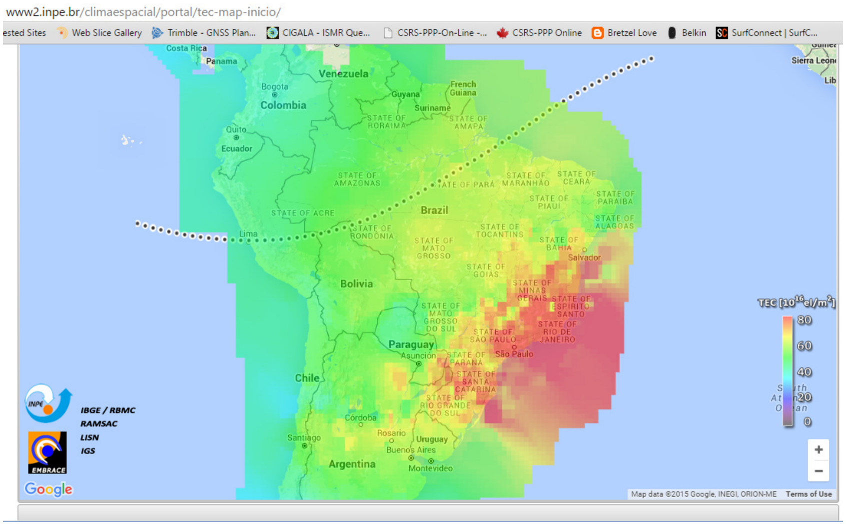
Mapa do atraso zenital troposférico nas observações GNSS

- Determinação do conteúdo do vapor d'água na atmosfera
- Previsão do tempo
- Monitoramento do aquecimento global

Sappuci et al. *Avaliação das Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul, Obtidas Usando Modelo de Previsão Numérica de Tempo com Alta Resolução Espacial.* Bol. Ciênc. Geod., sec. Comunicações, Curitiba, v. 14, no 4, p.591-605, out-dez, 2008

Estimativa do conteúdo de eletrons na ionosfera por GNSS

Mapa do conteúdo total de elétrons na ionosfera ⇒ monitoramento do clima espacial ⇒ propagação de ondas eletromagnéticas (impactos em sistemas de comunicação e transmissão de energia)



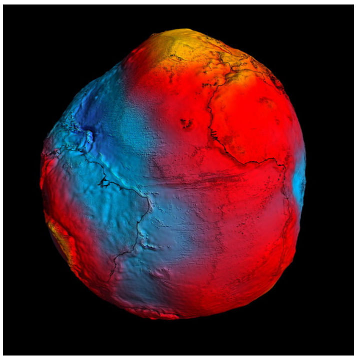
Papel atual da Geodésia

- A Geodésia é capaz de medir e analisar:
  - Deformações da crosta - litosfera
  - Variações ambientais - hidrosfera e atmosfera
- Com isto, a Geodésia contribui significativamente para o estudo dos processos geodinâmicos e de mudanças climáticas globais, que fazem parte do conjunto dos problemas atuais **mais graves** da humanidade

Papel atual da Geodésia

"Ciência que se ocupa da precisa medição e representação de três propriedades fundamentais da Terra: sua forma geométrica, sua orientação no espaço, e seu campo da gravidade, assim como das **mudanças destas propriedades com o tempo**"

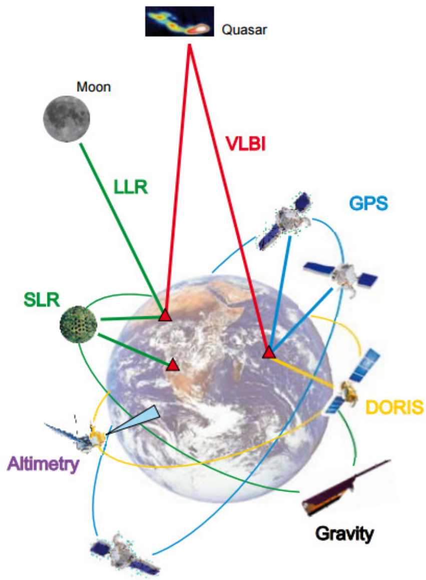
(fonte: adaptado de "Precise Geodetic Infrastructure: National Requirements for a Shared Resource. The National Academies Press, 2010" e dos Estatutos da IAG, 2015 - http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook/handbook_2016/102_IAG_Statutes.pdf)



Geoide determinado pelo GOCE
(fonte: ESA/HPF/DLR)

Sistema de Observação Geodésica Global (GGOS)

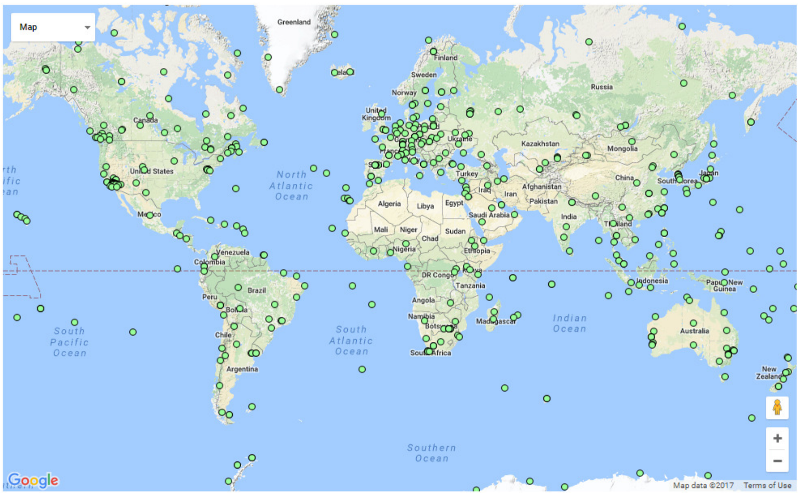
- Sistema global de observação integrada de todos os efeitos no sistema Terra, em desenvolvimento pela Associação Internacional de Geodésia
- Dois componentes: a organização e a infraestrutura de observação



(fonte: www.ggos-portal.org)

International GNSS Service (IGS)

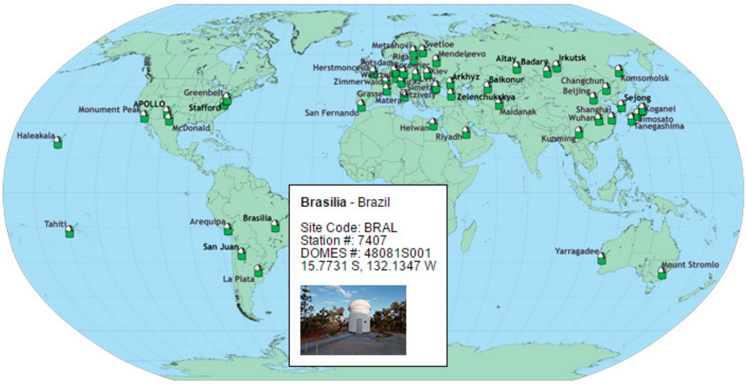
Rede IGS



~500 estações no total, ~420 em operação (ref. nov 2016)
(fonte: http://www.igs.org/)

International Laser Ranging Service (ILRS)

Rede ILRS

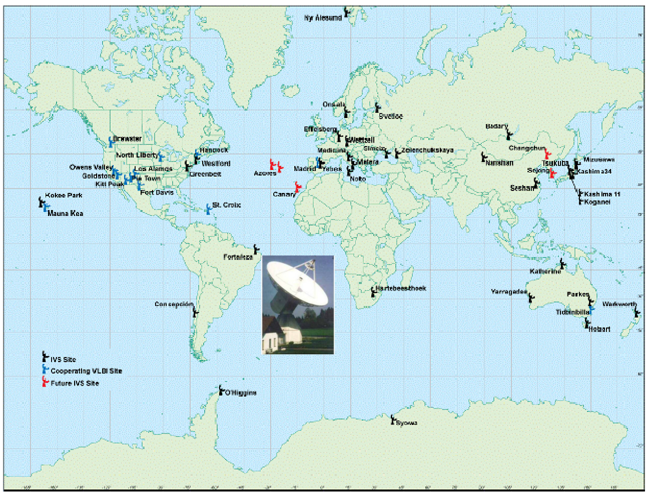


~50 estações (ref. nov 2016)

(fonte: http://ilrs.gsfc.nasa.gov/)

International VLBI Service (IVS)

Rede VLBI



~30 estações (ref. nov 2016)

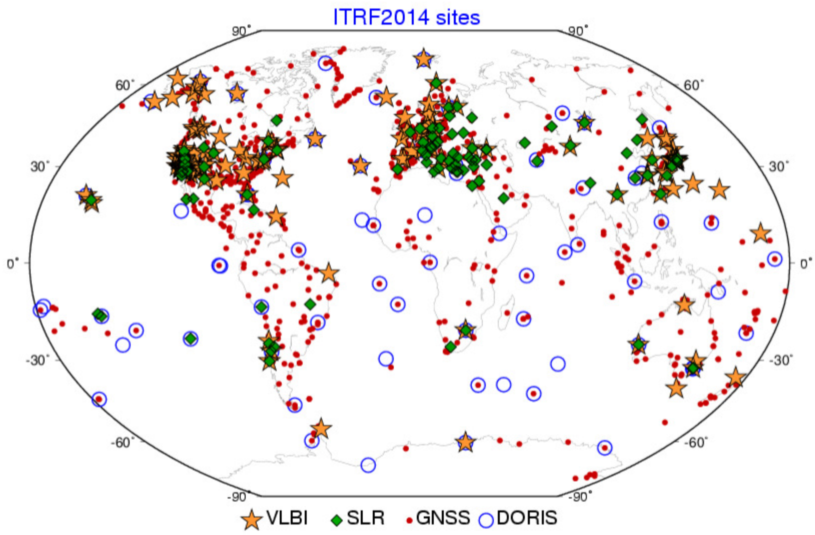
(fonte: http://ivscc.gsfc.nasa.gov/)

International DORIS Service (IDS)

Rede DORIS

96 estações no total, ~60 operacionais (ref. nov 2016)
(fonte: http://ids-doris.org/)

International Terrestrial Reference Frame 2014

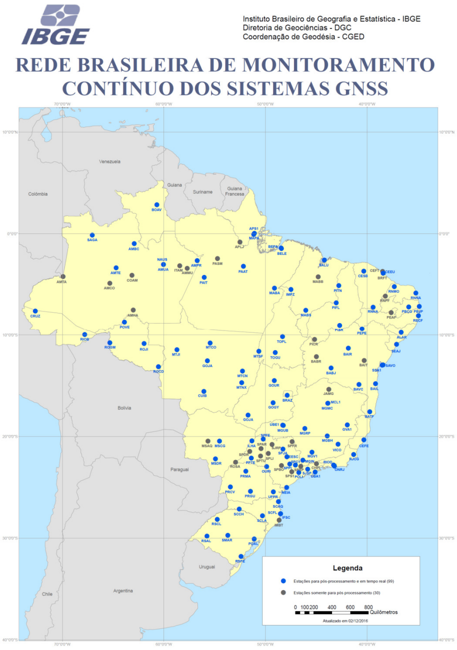


(fonte: http://www.igs.org/assets/pdf/W2016 - PY0606 - Altamimi.pdf)

No Brasil...

RBMC

- Primeira rede GNSS de operação contínua implantada na América do Sul
- Estrutura de referência e acesso ao SIRGAS2000
- **129** estações, com **99** funcionando em tempo real (RBMC-IP) (ref. Dez/2016)
- Em média **400.000** downloads por mês!
- Principal ligação com as Redes Geodésicas internacionais
- **Monitoramento contínuo da crosta terrestre e da atmosfera (e no futuro dos rios e do mar?...)**



(fonte: IBGE)

No Brasil...

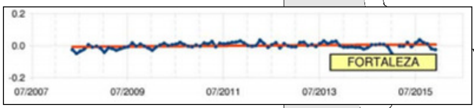
Estação NAUS da RBMC

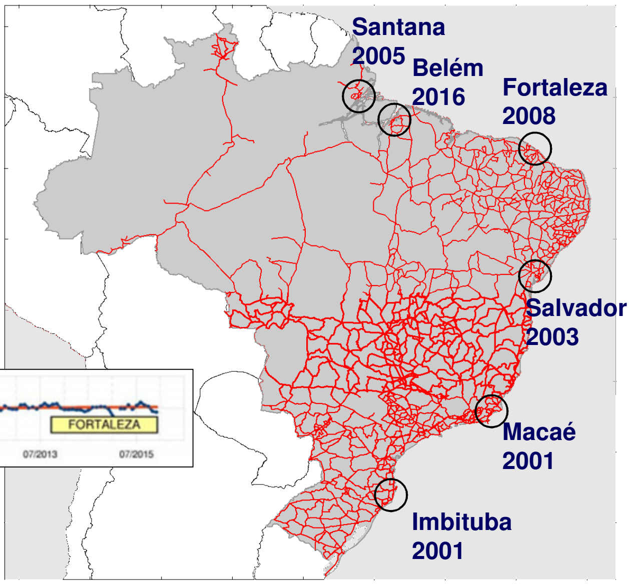
(fonte: IBGE)

No Brasil...

Rede Maregráfica Permanente para a Geodesia (RMPG)

- Monitoramento do nível do mar ao longo da costa brasileira
- Uso combinado de marégrafos e receptor GNSS
- Complementação da altimetria por satélites

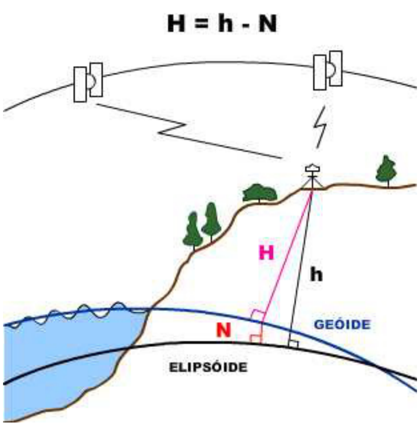




(fonte: IBGE, 2016)

No Brasil...

Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil – MAPGEO2015

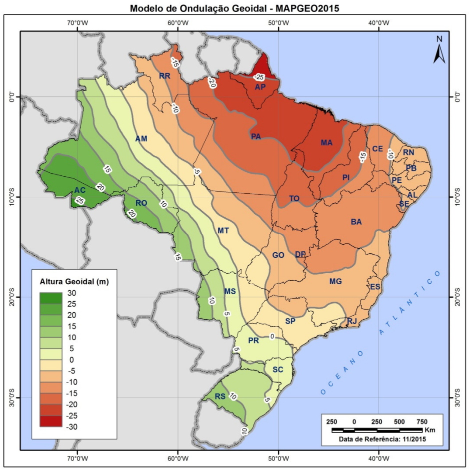


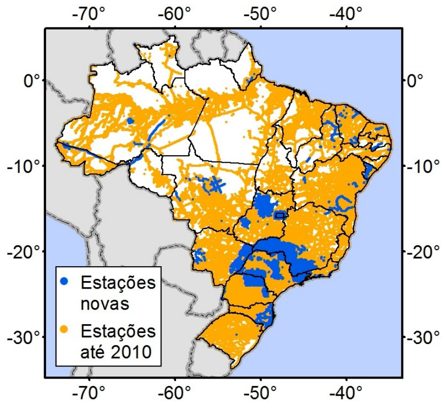
- Para determinação por GNSS de altitudes referidas ao nível médio do mar
- Gravimetria terrestre combinada com o modelo geopotencial global EIGEN-6C4 derivado do LAGEOS, GRACE, GOCE, EGM2008 e DTU
- Consistência de ± 0,17m com a Rede Altimétrica ≡ 20% de melhoria em relação ao MAPGEO2010

(fonte: IBGE)

No Brasil...

Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil – MAPGEO2015





450.000 Estações gravimétricas terrestres

(fonte: IBGE)

Perspectivas para a Geodésia do Brasil

Planialtimetria

- Beneficiada nas últimas duas décadas pelo advento dos sistemas **GNSS**
- Continuidade da participação nos esforços **continentais** e **globais**
  - SIRGAS ⇒ consistência com as estruturas geodésicas continentais
  - Global Geodetic Reference Frame (GGRF), do UN-GGIM
- Contínua densificação e modernização da **RBMC**
  - Maior detalhamento no monitoramento da terra, do ar e do mar no território brasileiro
  - Capacidade de rastreio dos sinais dos novos GNSS: Galileo e BeiDou
  - Expansão de parcerias

(fonte: IBGE)

Perspectivas para a Geodésia do Brasil

Altimetria

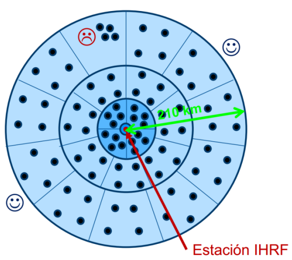
- Compreende grandes desafios por conta das dificuldades associadas aos **métodos clássicos** de determinação de altitudes físicas
- Densificação da **RMPG** (associada com GNSS) para subsidiar o monitoramento contínuo das variações do nível médio do mar ao longo da costa brasileira ⇒ relatórios anuais a partir de dez/2016
- Necessidade de integração dos referenciais altimétricos terrestre e marítimo (CONCAR) ⇒ potencialidade de exploração de reflectometria por GNSS
- Reajustamento da **Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP)** do Brasil em números geopotenciais, conforme diretrizes do **SIRGAS**
  - Integração da Rede Altimétrica do Amapá à RAAP
  - Integração ao **International Height Reference Frame (IHRF)**

(fonte: IBGE)

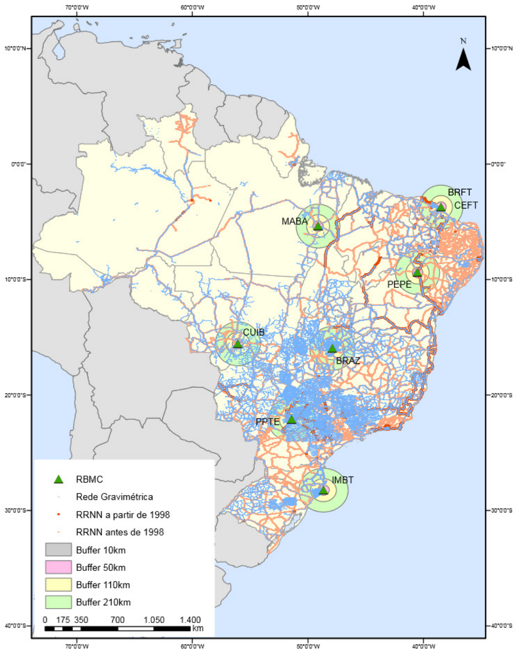
Perspectivas para a Geodésia do Brasil

Proposta preliminar de estações IHRF no Brasil

- Estações RBMC
- Vinculação à RAAP
- Densificação gravimétrica em seu entorno ~150 estações gravimétricas



(fontes: IBGE e Sanchez, 2016)



Perspectivas para a Geodésia do Brasil

Gravimetria/Mapa Geoidal

- Necessidade de priorizar e intensificar as atividades de refinamento do **Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil** para alcance de precisões centimétricas
  - Intensificação de conexões GNSS sobre Referências de Nível
  - Densificação gravimétrica terrestre nos vazios remanescentes no território nacional
  - Levantamento de aerogravimetria em áreas inacessíveis (Amazônia) e ao longo da costa
  - Incorporação dos resultados do reajustamento do RAAP
  - Revisão da metodologia de cálculo do modelo

(fonte: IBGE)

Cenário político-institucional global

Resolução da Assembleia Geral da ONU de 26/02/2015:
"Infraestrutura Geodésica Global de Referência para o Desenvolvimento Sustentável"
(www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A69/L.53)

- Primeira da história na área da informação geoespacial!
- Reconhecimento da importância de uma abordagem global coordenada para Geodésia
- Proposta de cooperação multilateral em Geodésia, incluindo o compartilhamento de dados geoespaciais, a construção de capacidades nos países em desenvolvimento e a criação de normas e especificações internacionais
- Copatrocinada por 52 Estados-Membros, incluindo o Brasil
- Totalmente alinhada com os esforços conduzidos pelo SIRGAS desde 1993 no sentido da modernização e unificação do Sistema Geodésico de Referência das Américas
- Ago/2016: criação de Subcomitê Permanente de Geodésia no âmbito do Comitê de Especialistas da ONU sobre Gestão Global da Informação Geoespacial (UN-GGIM)

Considerações finais

- A Geodésia…
  - É uma das ciências mais importantes para a observação das alterações que ocorrem na Terra, incluindo os continentes, oceanos e atmosfera
  - Fornece um sistema de referência único e preciso para todo o planeta, visando às aplicações científicas e práticas (posicionamento terrestre, marítimo e aéreo em geral, mapeamento, geoprocessamento, etc.)
- A localização é, para o mundo atual, uma componente vital para a tomada de decisão eficaz

2. Sistemas Geodésicos de Referência

2.1 Tridimensionais: ICRS/ICRF, ITRS/ITRF e suas densificações regionais e nacionais

2.2 Verticais: altitudes físicas e elipsoidais, superfícies de referência, sistemas nacionais, unificação de sistemas de altitude

2. Sistemas Geodésicos de Referência

2.1 Tridimensionais: ICRS/ICRF, ITRS/ITRF e suas densificações regionais e nacionais

2.2 Verticais: altitudes físicas e elipsoidais, superfícies de referência, sistemas nacionais, unificação de sistemas de altitude

Fundamentos de sistemas de referência

SIRGAS Necesidad de los sistemas de referencia

Geodesia global: La geodesia es la ciencia encargada de la medición y representación cartográfica de la superficie terrestre (Helmert 1880).

Navegación: La navegación moderna utiliza el posicionamiento automático. Las coordenadas de los aeropuertos, carreteras, faros, etc. deben darse en un sistema de referencia único.

Catastro: El catastro define los límites entre propiedades. Para evitar confusiones se requiere de un sistema de referencia único.

Cartografía: La cartografía requiere de un sistema de referencia único (global, regional) para evitar confusiones en límites políticos etc.

Ingeniería: El levantamiento de construcciones de ingeniería (túneles, puentes, etc.) utiliza métodos modernos (p.ej. GPS), que requieren de un sistema único para la zona de construcción.

Cambio global: La geodinámica y el cambio del clima producen variaciones de los parámetros geodésicos, que son muy pequeñas y requieren de una referencia global extremamente precisa.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Fundamentos de sistemas de referência

SIRGAS Ejemplos de sistemas globales de referencia

Sistemas de referencia terrestre (TRS)

World Geodetic System 1984 (WGS84): Sistema de referencia terrestre global que originalmente fue establecido para determinar las coordenadas de las órbitas de los satélites Doppler (WGS72). Fue adoptado para las órbitas de los satélites NAVSTAR GPS (broadcast ephemerides). WGS84 adoptó el ITRS en 2002.

International Terrestrial Reference System (ITRS): Sistema de referencia del Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia (IERS) establecido para la determinación de los sistemas de referencia celeste (ICRS) y terrestre (ITRS) y la relación entre los dos, o sea la orientación y rotación de la Tierra en el espacio (EOP, ERP).

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Fundamentos de sistemas de referência

SIRGAS Ejemplos de marcos de referencia

Marcos globales y regionales de referencia

International Terrestrial Reference Frame (ITRF): Materialización del ITRS por estaciones en la superficie terrestre (más de 900 puntos en más de 500 sitios) con coordenadas dadas para una época fija y sus variaciones en el tiempo (velocidades).

Sirve también para la determinación de las órbitas precisas de los satélites GPS por el Servicio GNSS Internacional (IGS).

Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS): Densificación del ITRF, inicialmente establecido para América del Sur por 58 estaciones en campaña de 1995 y extendido al Caribe, Norte y Centroamérica en 2000 con 184 estaciones. Actualmente tiene más de 200 estaciones permanentes.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Fundamentos de sistemas de referência

SIRGAS Sistemas de referencia clásicos y modernos

Por qué necesitamos sistemas de referencia nuevos? Por qué no podemos utilizar los sistemas clásicos (PSAD56, SAD69, NAD83)?

→ Porque utilizamos métodos satelitales. Hay que garantizar la identidad de los sistemas de referencia terrestres y los de satélites.

→ Porque os sistemas clássicos não apresentavam precisão compatível com GNSS

Sistemas modernos de referencia se definen por un dátum global:

El orígen es el centro de masas terrestres (geocentro $X_0=Y_0=Z_0=0$), porque los satélites orbitan alrededor del geocentro (ley de Kepler).

La orientación se dá por el eje de rotación de la Tierra (eje Z) y la convención de una longitud (eje X en el meridiano de Greenwich).

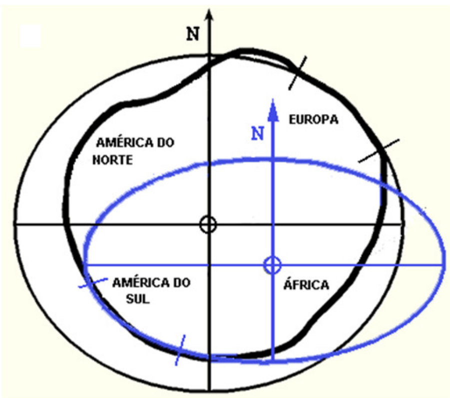
La escala métrica se dá por la velocidad de la luz y (en caso del uso de los métodos satelitales) por la constante geocéntrica GM.

Los sistemas modernos siempre son tridimensionales: X, Y, Z, o transformados a Norte, Este, Altura sobre un elipsoide.

(fonte: adaptado da Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistemas Geodésicos Regionais

- Referencial adaptado a uma região (país ou Continente) devido à limitação dos métodos de posicionamento utilizados (por exemplo: poligonação)
- Possibilidade de existência de mais de um sistema de referência em cada região ou País



Campo Inchauspe

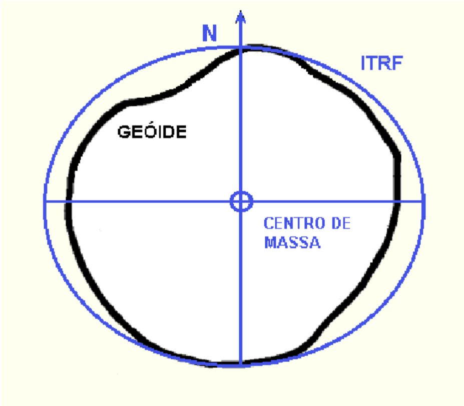
Córrego Alegre

PSAD56

SAD 69

Sistemas Globais

- Modernas técnicas de posicionamento possibilitam levantamentos globais (e.g., Sistemas GNSS)
- Origem do sistema é o centro de massas da Terra (Sistemas Geocêntricos)



WGS 84	**World Geodetic System 1984**
ITRS	**International Terrestrial Reference System**
SIRGAS	**Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas**

Fundamentos de sistemas de referência

SIRGAS Organización de los sistemas modernos

Los sistemas de referencia se instalan y se mantienen por Servicios científicos de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG).

Hay un servicio especial para cada técnica de observación:
- Servicio internacional GNSS (International GNSS Service, IGS),
- Servicio internacional de rastreo láser (International Laser Ranging Service, ILRS),
- Servicio internacional de interferometría en líneas base muy largas (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS),
- Servicio internacional de orbitografía Doppler por radiometría integrado por satélite (International DORIS Service, IDS).

El servicio internacional de rotación terrestre y de sistemas de referencia (International Earth Rotation and Reference Systems' Service, IERS) coordina las actividades para el marco internacional de referencia (International Terrestrial Reference Frame, ITRF).

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS 2. Sistema celeste y orientación de la Tierra

Sistema de referencia celeste = Sistema inercial convencional
- Sistemas inerciales son sistemas sin fuerzas externas.
- Las fórmulas originales de la física (mecánica celeste, teoría de relatividad, ...) se refieren a sistemas inerciales.

↕

Parámetros de orientación de la Tierra (EOP)
- rotación del sistema terrestre con respecto al sistema celeste

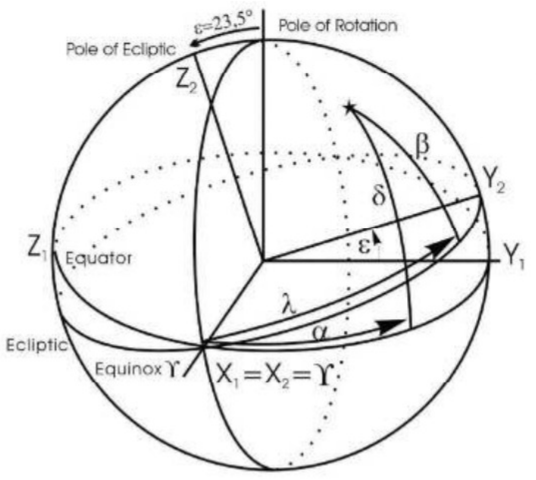
↕

Sistema de referencia terrestre = Sistema global convencional
- Sistemas terrestres están asociados a la Tierra sólida.
- Participan en todos los movimientos de la Tierra rígida y en las deformaciones de la corteza terrestre.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS Sistema de referencia celeste (inercial)



Sistema eclíptico y ecuatorial

Coordenadas de un objeto en el espacio (estrella, fuente radio):
- sistema ecuatorial: ascensión recta α declinación δ
- sistema eclíptico: longitud eclíptica λ latitud eclíptica β (casi no se utiliza)

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS

Realización del sistema de referencia celeste (ICRF)

El ICRS (International Celestial Reference System) se materializa mediante coordenadas de fuentes de radio extragalácticas (Quasars) observadas por Very Long Baseline Interferometry (VLBI). La materialización se llama International Celestial Reference Frame (Marco de Referencia Celeste Internacional), ICRF.

El ICRF actual (ICRF2 de 2009) contiene coordenadas de fuentes de radio extragalácticas para la época 2000.0 en tres categorías:

- 295 fuentes que definen el datum,
- 3080 fuentes globales addicionales,
- 39 fuentes inestables de tratamiento especial,

- 3414 fuentes en total.

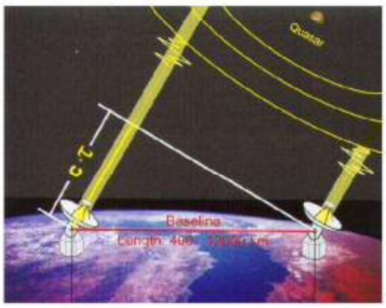
(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS

Realización del ICRF por VLBI

Interferometría de lineas de base muy largas (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)



Dos telescópios reciben la señal de la misma fuente radio (Quasar) en tiempo diferente.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Exemplo de Coordenadas do ICRF2

Coordinates of 295 ICRF2 defining sources

ICRF Designation (1)	IERS Des. (2)	Right Ascension J2000.0 h m s	Declination J2000.0 o ' "	Uncertainty R.A. s	Uncertainty Dec. "	Corr. RA-Dc	Mean MJD	First MJD	Last MJD	Nb sess.	Nb del.
ICRF J000435.6-473619	0002-478	00 04 35.65550384	-47 36 19.6037899	0.00001359	0.0002139	0.383	52501.0	49330.5	54670.7	28	129
ICRF J001031.0+105829	0007+106	00 10 31.00590186	10 58 29.5043827	0.00000491	0.0000930	-0.187	53063.9	47288.7	54803.7	29	559
ICRF J001101.2-261233	0008-264	00 11 01.24673846	-26 12 33.3770171	0.00000660	0.0000936	-0.183	52407.5	47686.1	54768.6	45	592
ICRF J001331.1+405137	0010+405	00 13 31.13020334	40 51 37.1441040	0.00000482	0.0000683	-0.139	51619.2	48434.7	54713.7	22	1083
ICRF J001611.0-001512	0013-005	00 16 11.08855479	-00 15 12.4453413	0.00000435	0.0001005	-0.235	50403.0	47394.1	51492.8	67	716
ICRF J001945.7+732730	0016+731	00 19 45.78641940	73 27 30.0174396	0.00000989	0.0000424	-0.050	49249.8	44343.6	54865.7	458	25038
ICRF J002232.4+060804	0019+058	00 22 32.44120914	06 08 04.2690807	0.00000439	0.0000956	-0.237	52705.8	47394.1	54880.7	42	800
ICRF J003824.8+413706	0035+413	00 38 24.84359231	41 37 06.0003032	0.00000499	0.0000613	-0.035	52262.4	49422.9	54887.7	18	1024
ICRF J005041.3-092905	0048-097	00 50 41.31738756	-09 29 05.2102688	0.00000278	0.0000428	-0.030	51323.1	44773.8	54816.7	1802	41482
ICRF J005109.5-422633	0048-427	00 51 09.50182012	-42 26 33.2932480	0.00000932	0.0001177	0.013	53857.8	52306.7	54907.7	31	315
ICRF J010245.7+582411	0059+581	01 02 45.76238248	58 24 11.1366009	0.00000523	0.0000414	0.009	52030.9	48720.9	54880.7	1864	236989
ICRF J010645.1-403419	0104-408	01 06 45.10796851	-40 34 19.9602291	0.00000376	0.0000455	0.016	52201.3	47640.2	54903.8	1175	11531
ICRF J010915.4-604948	0107-610	01 09 15.47520598	-60 49 48.4599686	0.00001744	0.0001750	0.108	53933.9	52780.7	54726.7	24	102
ICRF J011205.8+224438	0109+224	01 12 05.82471754	22 44 38.7863909	0.00000379	0.0000653	-0.007	51836.0	48434.7	54872.7	37	1851
ICRF J011327.0+494824	0110+495	01 13 27.00680344	49 48 24.0431742	0.00000597	0.0000727	-0.135	52989.4	49422.9	54781.7	20	759
ICRF J011857.2-214130	0116-219	01 18 57.26216666	-21 41 30.1399986	0.00000683	0.0001138	-0.058	52128.2	50632.3	54768.6	19	289
ICRF J012141.5+114950	0119+115	01 21 41.59504339	11 49 50.4131012	0.00000279	0.0000429	-0.018	52622.1	47394.1	54901.7	1151	36167
ICRF J013305.7-520003	0131-522	01 33 05.76255607	-52 00 03.9457209	0.00001218	0.0001605	0.251	52621.9	48162.4	54901.7	28	126
ICRF J013658.5+475129	0133+476	01 36 58.59480585	47 51 29.1000445	0.00000407	0.0000414	0.014	52890.7	44343.6	54907.7	1307	117353
ICRF J013708.7+312235	0134+311	01 37 08.73362970	31 22 35.8553611	0.00000553	0.0001012	0.044	53105.6	50219.8	54901.7	13	550
ICRF J014125.8-092843	0138-097	01 41 25.83215547	-09 28 43.6741894	0.00000455	0.0000878	-0.020	52777.3	46875.8	54768.6	34	1008
ICRF J015456.2+474326	0151+474	01 54 56.28988783	47 43 26.5395732	0.00000530	0.0000654	-0.014	53123.2	49750.8	54657.8	21	1395
ICRF J020333.3+723253	0159+723	02 03 33.38496841	72 32 53.6672938	0.00001231	0.0000546	0.052	52872.5	47011.4	54907.7	35	1482
ICRF J020504.9+321230	0202+319	02 05 04.92536007	32 12 30.0954538	0.00000367	0.0000520	-0.038	52311.3	45466.3	54852.7	62	2357
ICRF J021748.9+014449	0215+015	02 17 48.95475182	01 44 49.6990704	0.00000348	0.0000673	-0.120	51978.4	48919.9	54837.7	37	1200
ICRF J022428.4+065923	0221+067	02 24 28.42819659	06 59 23.3415393	0.00000382	0.0000683	-0.214	52153.5	47394.1	54662.7	68	1173
ICRF J022934.9-784745	0230-790	02 29 34.94659358	-78 47 45.6017972	0.00003546	0.0001073	0.032	52873.3	47626.5	54726.7	49	247
ICRF J023145.8+132254	0229+131	02 31 45.89405431	13 22 54.7162668	0.00000281	0.0000422	-0.006	49841.4	44773.8	54844.7	2537	66911
ICRF J023631.1-295355	0234-301	02 36 31.16942057	-29 53 55.5402759	0.00000978	0.0001544	-0.032	53761.6	53126.1	54741.8	16	135
ICRF J023653.2-613615	0235-618	02 36 53.24574589	-61 36 15.1834250	0.00002197	0.0001688	0.249	53734.9	52861.2	54670.7	17	106
ICRF J023752.4+284808	0234+285	02 37 52.40567732	28 48 08.9900231	0.00000313	0.0000421	-0.023	49361.6	44447.0	54664.7	1199	53070
ICRF J023945.4-023440	0237-027	02 39 45.47226775	-02 34 40.9144020	0.00000359	0.0000672	-0.090	52760.9	49253.8	54901.7	36	1437
ICRF J030335.2+471616	0300+470	03 03 35.24222254	47 16 16.2754406	0.00000417	0.0000433	-0.048	48470.0	44343.6	54844.7	757	25008
ICRF J030350.6-621125	0302-623	03 03 50.63134799	-62 11 25.5498711	0.00001499	0.0001135	0.150	51436.6	48162.4	54726.7	44	248

(fonte: http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS

Interrelación de ICRF e ITRF

Problema:

Los cuerpos celestes (estrellas, fuentes radar) y los satélites artificiales, que utilizamos para las mediciones en el sistema terrestre, no participan en la rotación de la Tierra. Por eso hay que conocer en cada instante de una medición desde la superficie terreste hasta un cuerpo extraterrestre la orientación de la Tierra con respecto al sistema celeste.

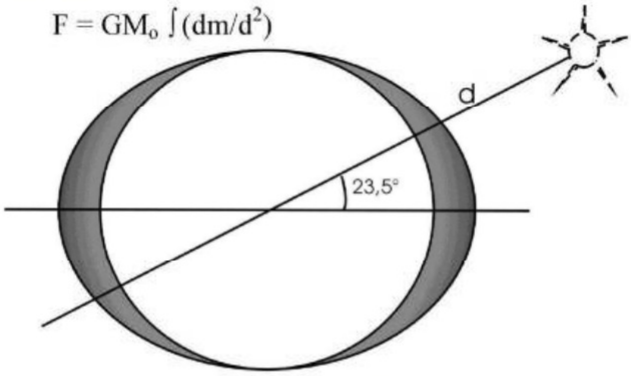
Los parámetros de orientación (EOP) se derivan por la observación continua de la rotación de la Tierra. Se necesitan modelos de la variación de rotación basados en los efectos físicos que los generan.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS — Variación de la orientación espacial

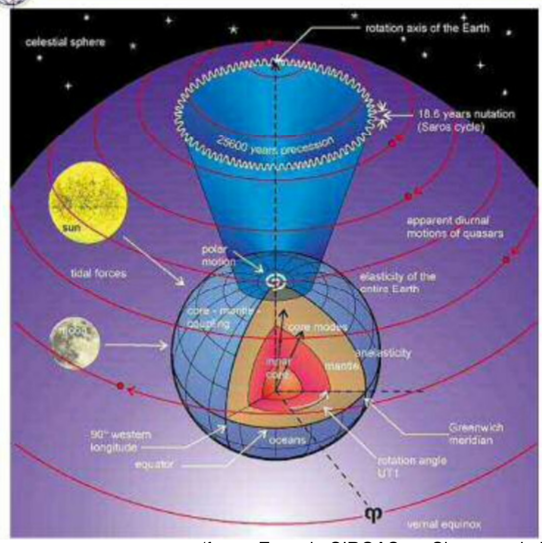
Causa de la variación de la orientación de la Tierra en el espacio (precesión y nutación): Efecto asimétrico de la fuerza lunisolar sobre el abultamiento ecuatorial.



(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS — Precesión y nutación



La fuerza lunisolar causa el efecto, que el eje de rotación de la Tierra tambalea en el espacio.

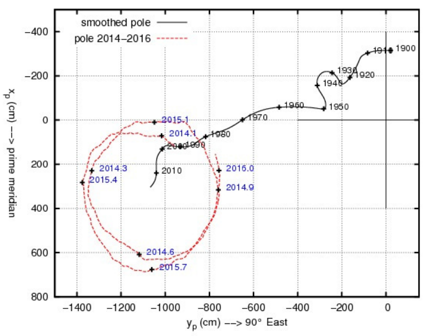
Tradicionalmente, se distinguen por las frecuencias precesión (frecuencia baja) y nutación (frecuencia más alta).

Esta distinción se terminó en el ICRF en el año 2000.

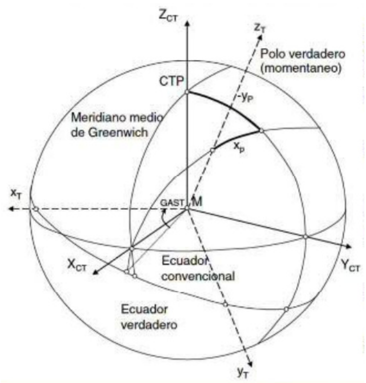
(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Movimento do Polo

- Eixo instantâneo de rotação da Terra não é fixo em relação à crosta
- Coordenadas do Polo instantâneo em relação ao Polo médio: x_p, y_p



(fonte: http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=pm)



(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS

Reducción de precesión y nutación en las observaciones geodésicas y astronómicas

Sistema inercial convencional (Conventional inertial system, CIS)		Sistema celeste intermedio (Celestial intermediate system)
Sistema ecuatorial de una época fija (p.ej., t_0 = 2000.0)	(Precesión) Nutación →	Sistema ecuatorial momentáneo (verdadero)
Eje Z = polo celeste en la época fija		Eje Z = polo celeste intermedio (Celestial intermediate pole, CIP)

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência celeste e orientação da Terra

SIRGAS

Reducción de la variación de los ERP

Sistema celeste intermedio (Celestial intermediate system)		Sistema terrestre convencional (Conventional terrestrial system)
Sistema ecuatorial momentaneo (verdadero)	Movimiento del polo (X_P, Y_P) y variación de velocidad angular (DUT)	Sistema global de una época fija (p.ej., t = 2000.0)
Eje Z = polo celeste intermedio (Celestial Intermediate Pole, CIP)	→	Eje Z = eje del sistema de coordenadas de los puntos definidos en el sistema convencional

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência terrestre e sua realização

SIRGAS

Definición del sistema de referencia terrestre

- El sistema de referencia terrestre debe ser consistente con el sistema de referencia celeste (inercial), en él que también se calculan las órbitas de los satélites.
- El orígen está en el centro de las masas terrestres (incluyendo la atmósfera y los océanos), porque los satélites orbitan alrededor del geocentro según las leyes de Kepler.
- La orientación es compatible con el sistema del Bureau International de l'Heure (BIH) de 1984 (eje Z cerca del eje de rotación terrestre y eje X cerca del medidiano de Greenwich).
- La escala es métrica según el SI como distancia recorrida por la luz en el vacío en 1 / 299 792 458 segundos.
- La evolución en el tiempo no debe generar residuales con respecto al la rotación global referente a la corteza terrestre.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência terrestre e sua realização

What does each technique provide to the Reference Frame

- SLR: Uniquely provides Earth Center of Mass;
- VLBI: Provides EOP parameters and the connection with the Celestial Reference Frame (stars);
- SLR and VLBI independently provide Scale
- GPS: Global coverage and density
- DORIS: Global coverage
- Gravimetry: Help interpret station dynamics
- Tide gauge vertical rates can be accurately defined only in the context of a terrestrial reference frame

Each has an important roll in the improvement of the reference frame

(fonte: Pearlman, 2015)

Sistema de referência terrestre e sua realização

SIRGAS

Dependencia del sistema de referencia terrestre del tiempo

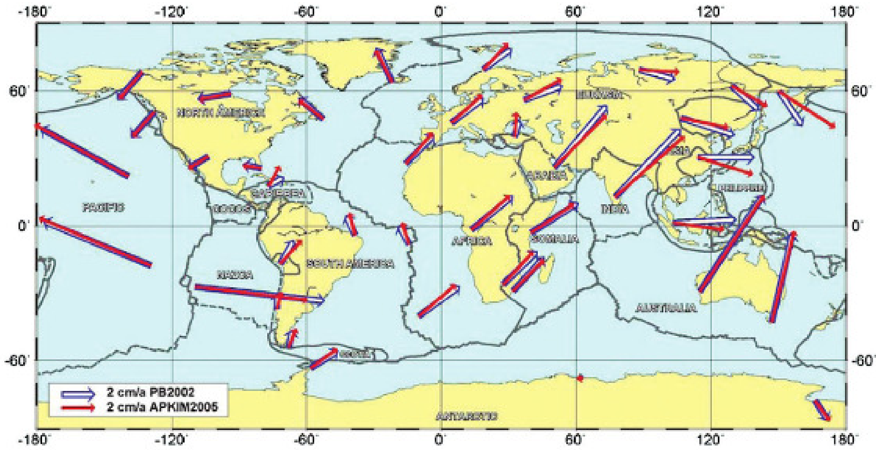
- Para conservar la consistencia entre las coordenadas en el sistema terrestre convencional y las posiciones actuales y las efemérides de los satélites, hay que corregir las coordenadas de las estaciones terrestres por sus movimientos (velocidades).
- Los movimientos requieren de un sistema de referencia cinemático al que se refieran las velocidades.
- Las deformaciones mayores de la corteza terrestre provienen del movimiento de las placas tectónicas (cinemática de placas).
- El sistema de referencia cinemático se define, tradicionalmente, por los modelos geológicos y geofísicos de la cinemática de placas (AM0-2, *Minster y Jordan 1974, 1978*; NNR NUVEL-1A, *De Mets et al., 1990, 1991, 1994*).

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistema de referência terrestre e sua realização

SIRGAS

Modelos geofísicos y geodésicos de la cinemática de las placas tectónicas



(El modelo PB2002 es idéntico con NNR NUVEL–1A para las placas mayores)

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

SIRGAS

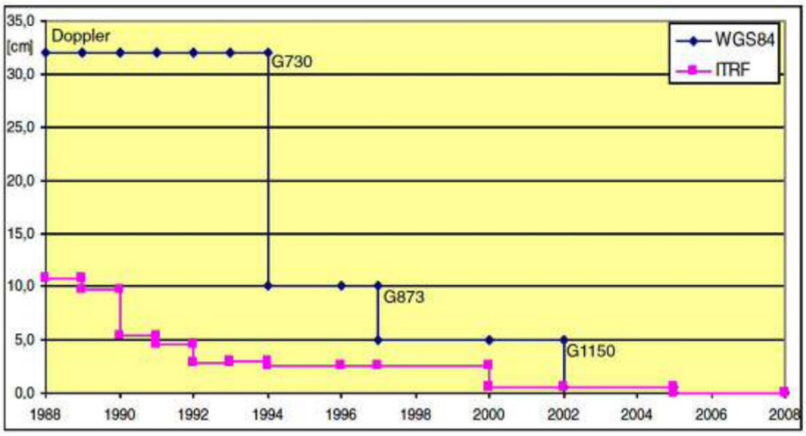
5. Marco de referencia terrestre global

- La realización del sistema de referencia terrestre se efectúa, en el principio, siempre global (geocéntrico, girando con la rotación terrestre) por un marco de referencia, que es un conjunto de puntos con coordenadas y velocidades (X, dX/dt) muy precisas.
- Según las resoluciones de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) hay un solo marco de referencia terrestre, el International Terrestrial Reference Frame (ITRF), que fue adoptado por todas las aplicaciones científicas y prácticas.
- El World Geodetic System (WGS84) no tiene realización por un marco de referencia terrestre, que sea publicamente accesible. Se realiza solo por las efemérides de emisión de los satélites GPS (broadcast ephemeris), que no se usan para posicionamiento preciso. Para calcularlas, WGS adoptó las coordenadas ITRF!

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

Convergencia del WGS84 al ITRF



A partir de la semana GPS 1150, WGS84 e ITRF son idénticos!

WGS 84 (G1762): adotado em out 2013, baseado no ITRF08
→ diferença para WGS 84 (G1150) ~2 cm

(fonte: adaptado de Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

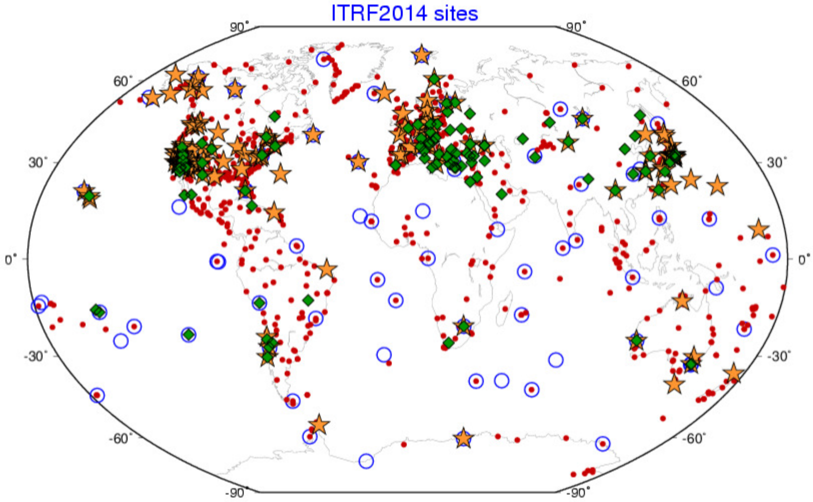
Soluções ITRF geradas pelo IERS

Transformation parameters from ITRF2014 to past ITRFs.

SOLUTION	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOCH
UNITS---------->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
	.	.	.	.	.	.	.	
RATES	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
UNITS---------->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/y	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2008	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	2.6	1.0	-2.3	0.92	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.3	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	0.7	1.2	-26.1	2.12	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.1	0.1	-1.9	0.11	0.00	0.00	0.00	
ITRF97	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	-50.4	3.3	-60.2	4.29	-2.81	-3.38	0.40	2010.0
rates	-2.8	-0.1	-2.5	0.12	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	15.4	1.5	-70.8	3.09	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	27.4	15.5	-76.8	4.49	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	25.4	11.5	-92.8	4.79	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	30.4	35.5	-130.8	8.19	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	25.4	-0.5	-154.8	11.29	0.10	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	

(fonte: http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt)

International Terrestrial Reference Frame 2014



(fonte: http://www.igs.org/assets/pdf/W2016 - PY0606 - Altamimi.pdf)

Densificações regionais e nacionais do ITRF

SIRGAS 6. Marcos regionales y nacionales

- El marco global ITRF se densifica por redes regionales medidas por GPS en conexión con estaciones globales del IGS. La primera red de este tipo fue la de Europa iniciada en el año 1988.
- En el principio, se instalaron redes por campañas GPS, hoy en día se establecen cada vez más estaciones permanentes (de observación continua).
- Las observaciones continuas de estaciones regionales aceptadas por el IGS se procesan en los "Regional Network Associate Analysis Centers", RNAAC.
- Las redes regionales (continentales) se densifican por redes nacionales, que igualmente se instalaron en el principio por campañas, y cada vez más se convierten a estaciones permanentes.
- La red continental de America Latina (Norte, Central y Sur) es el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS).

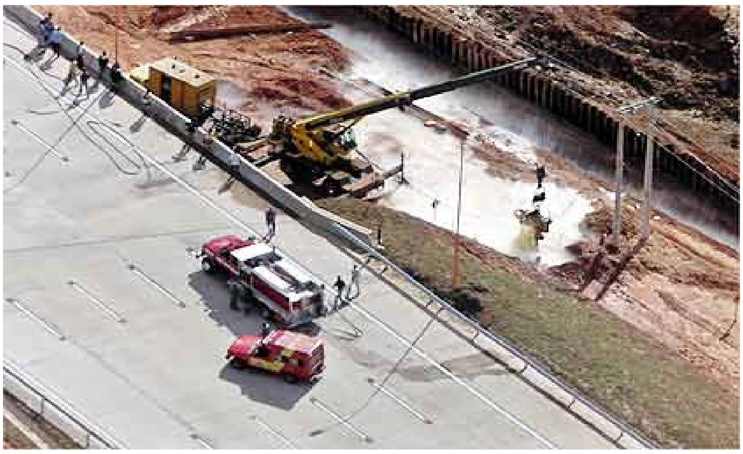
(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Consequências do uso de Sistemas Geodésicos de Referência diferentes

Importância de um Referencial Geodésico único

Exemplo: acidente que aconteceu em São Paulo em 2001 quando a máquina de perfuração da empreiteira atingiu um gasoduto, justamente por usarem sistemas de referência diferentes (inconsistentes)

- 2.000 pessoas tiveram que deixar suas casas durante 28hs
- Estrada bloqueada por 12hs

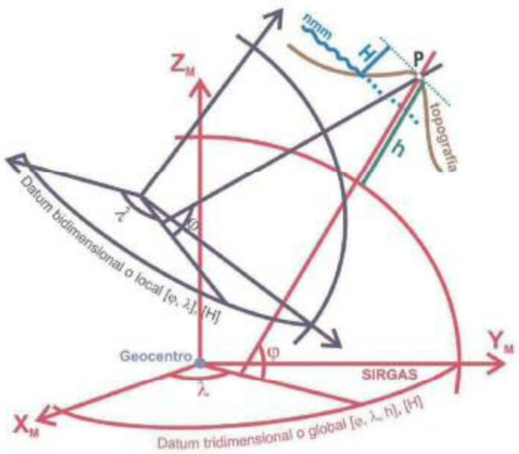


2. Sistemas Geodésicos de Referência

2.1 Tridimensionais: ICRS/ICRF, ITRS/ITRF e suas densificações regionais e nacionais

2.2 Verticais: altitudes elipsoidais e físicas, superfícies de referência, sistemas nacionais, unificação de sistemas de altitude

Coordenada Vertical



Geodesia clásica:

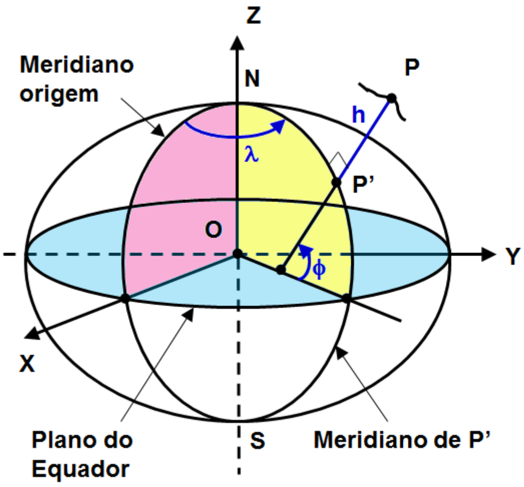
- independiente de la posición horizontal
- nivel medio del mar (geoide)
- nivelación geométrica

Geodesia moderna:

- determinación simultánea con la posición horizontal
- elipsoide de referencia
- posicionamiento GNSS (p. ej. GPS)

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Altitude elipsoidal: 3ª componente das coordenadas geodésicas curvilíneas



P: ponto sobre a superfície terrestre

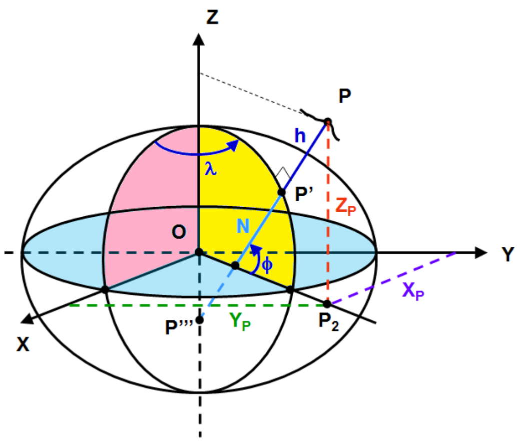
P': projeção de **P** sobre a superfície do elipsoide segundo a reta normal ao plano tangente ao elipsoide (em **P'**)

Latitude geodésica de P (ϕ): ângulo que a normal ao elipsoide passando por P (e P') faz com o plano do Equador

Longitude geodésica de P (λ): ângulo diedro entre o plano que contém o meridiano de P' e o plano que contém o meridiano origem

Altitude geométrica ou elipsoidal (h): distância entre P e P' contada sobre a normal

Altitude elipsoidal



- Considerando que o elipsoide de revolução é uma figura geométrica, definida por convenção, não é possível medir diretamente a altitude elipsoidal

Ela é calculada a partir das coordenadas cartesianas determinadas por GNSS

$$h = \frac{\sqrt{X_P^2 + Y_P^2}}{\cos\phi} - N$$

onde **N** é o raio de curvatura da seção Primeiro Vertical (Grande Normal)

Altitude elipsoidal

SIRGAS **Determinación de alturas con técnicas GNSS**

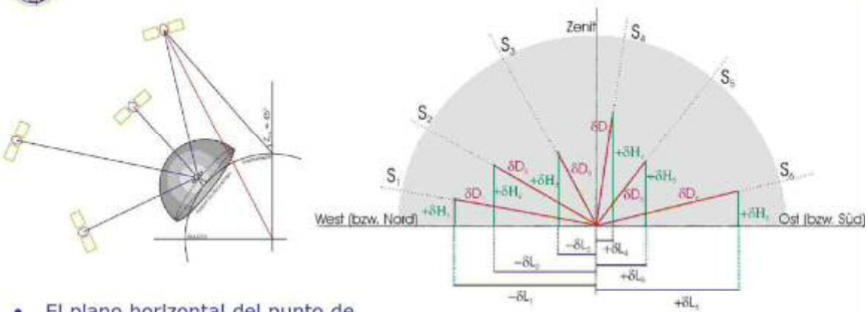
En el **posicionamiento GNSS**, la coordenada vertical **(h) es entre 2 y 3 veces menos precisa** que las coordenadas horizontales **(φ, λ)**. Las principales causas pueden clasificarse en:

- **Características inherentes** a los sistemas GNSS (constelación satelital, geometría de las observaciones, etc.)
- **Errores sistemáticos** asociados al posicionamiento GNSS (errores de los relojes, retardo atmosférico, efecto multicamino, etc.)
- **Efectos físicos** (cargas atmosférica, ocánica e hidrológica, procesos geodinámicos, etc.)

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Altitude elipsoidal

SIRGAS **Geometría de las observaciones GNSS**



- El plano horizontal del punto de observación está "cubierto" de señales satelitales en un azimut de 0 a 360°. El plano vertical, está "cubierto" de señales satelitales solamente entre 0° y 180°.

$\Sigma - \delta L_i \sim \Sigma + \delta L_i$

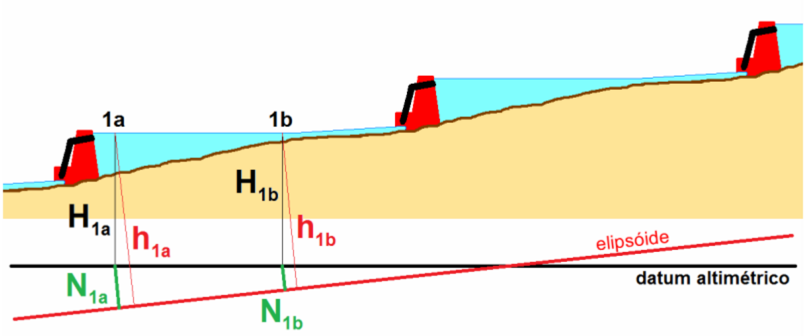
$\Sigma + \delta H_i \sim ?$

- Los errores sistemáticos se eliminan (en buena proporción) por la recepción de señales en azimutes contrarios (simetría de observación), en la componente vertical esto no es posible.
- Por tanto, no pueden separarse los errores radiales (p. ej. sincronización de los relojes de los receptores, efectos atmosféricos, etc.) de los errores en la altura

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Altitude elipsoidal x altitude física

A grande maioria das aplicações de engenharia requer que as altitudes tenham significado físico para mapear o movimento/equilíbrio de massas d´água ⇒ necessidade de **altitudes físicas**!

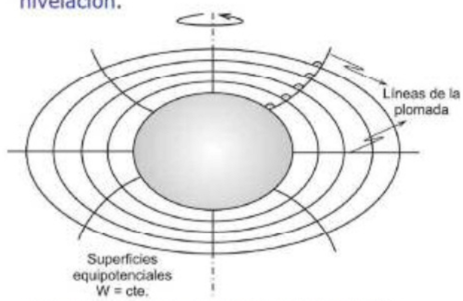


(fonte: Luz, 2016)

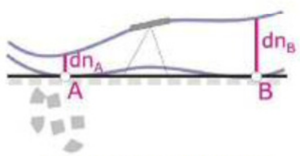
Altitudes físicas

SIRGAS **Nivelación geométrica**

- Los sistemas de medición utilizados para la determinación de alturas (y en general coordenadas) se orientan según campo de gravedad terrestre.
- El plano horizontal del instrumento coincide con la línea tangente a la superficie equipotencial que pasa por el punto de observación.
- El eje vertical del instrumento coincide con la línea de la plomada.
- La separación entre dos superficies equipotenciales varía con la gravedad en proporción inversa: $dn_A \neq dn_B$.
- **Consecuencia:** La altura nivelada de un punto depende de la trayectoria de nivelación.



Geometría de las superficies equipotenciales



Orientación de un instrumen de medición con el campo de gravedad terrestre.

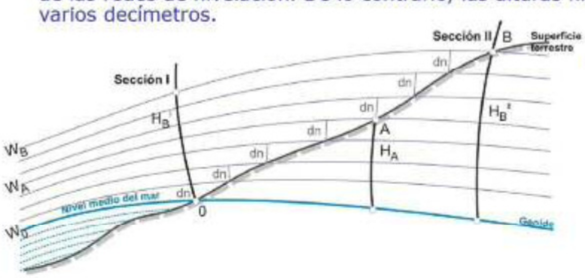
(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Altitudes físicas

SIRGAS

Nivelación geométrica

- Las diferencias de nivel medidas deben ser corregidas por el efecto de la gravedad o ser transformadas en diferencias de potencial antes de hacer el ajuste de las redes de nivelación. De lo contrario, las alturas finales incluyen errores de varios decímetros.



Error de cierre teórico:

$$\varepsilon = \oint dn$$

$$\Rightarrow \mathbf{H_B \neq \Sigma\, dn}$$

La diferencia de nivel ***dn*** medida entre dos puntos ***(A, B)*** ubicados sobre la superficie terrestre y sobre equipotenciales diferentes $(\boldsymbol{W_A}, \boldsymbol{W_B})$ es:

$$dn_{BA} = (H_B - H_A) = \frac{W_A - W_B}{\hat{g}}$$

$\hat{g}$ es el valor medio de la gravedad a lo largo de la línea de nivelación entre las equipotenciales $\boldsymbol{W_A}$ y $\boldsymbol{W_B}$

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

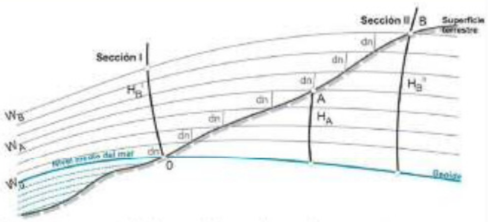
Altitudes físicas

SIRGAS

Números geopotenciales

Si el punto inicial de la nivelación ***0*** esta sobre el geoide $(\boldsymbol{W_0})$, la diferencia de potencial se conoce como ***número o cota geopotencial*** y se define mediante:

$$C_B = W_0 - W_B = \int_0^B g\,\delta n \cong \sum_0^B g\, dn$$



g se asume igual al promedio del valor de gravedad medido sobre dos puntos nivelados consecutivamente. La determinación de $\boldsymbol{C_B}$ es unívoca, no depende de la trayectoria de nivelación y en un circuito cerrado satisface la condición: $\oint dW = 0$

Los números geopotenciales se miden en ***kiloGal por metro*** **[kGal m]**, que equivale a **[10 m² s⁻²]**.

La altura de ***B*** se obtiene mediante:

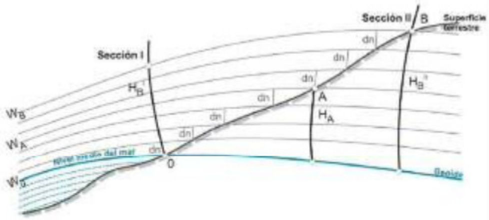
$$H_B = \frac{W_0 - W_B}{\hat{g}} = \frac{C_B}{\hat{g}}$$

siendo $\hat{g}$ el valor medio de la gravedad entre la superficie de referencia $(\boldsymbol{W_0})$ y el punto nivelado $(\boldsymbol{W_B})$.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Altitudes físicas

SIRGAS **De números geopotenciales a unidades de longitud**



Número gepotencial:

$$C_B = W_0 - W_B = \int_0^B g\,\delta n \cong \sum_0^B g\,dn$$

en ***kiloGal por metro*** **[kGal m]** ó **[10 m² s⁻²]**.

Por conveniencia las **diferencias de nivel** se expresan en **metros**, es decir, los números geopotenciales se escalan a través de un **valor de gravedad** y se convierten en alturas. Dado que los números geopotenciales dependen del **campo de gravedad**, las alturas derivadas de ellos también. Dichas alturas se conocen como **alturas físicas**:

$$H_B = \frac{W_0 - W_B}{\hat{g}} = \frac{C_B}{\hat{g}}$$

La diferencia **(W_0 - W_B)** es constante, de allí, la altura de ***B*** depende del valor de $\hat{g}$ utilizado; así, en función de su estimación, se habla de diferentes tipos de **alturas físicas**, a saber: **dinámicas**, **normales** y **ortométricas**.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Altitudes físicas

$$H_B = \frac{C_B}{\hat{g}}$$

- **Dinâmicas:** $\hat{g}$ é a gravidade normal γ sobre o elipsoide para uma latitude específica (normalmente, 45°) ⇒ não têm significado geométrico
- **Ortométricas:** $\hat{g}$ é a gravidade real média entre o geoide e o ponto, calculada ao longo da vertical ⇒ depende de hipóteses físicas (densidade da crosta terrestre, gradiente vertical da gravidade na crosta, etc.)
- **Normais:** $\hat{g}$ é a gravidade normal média entre o quasigeoide e o ponto, calculada ao longo da normal ao elipsoide ⇒ não requer a formulação de hipóteses para a sua determinação

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Altitudes físicas no SIRGAS

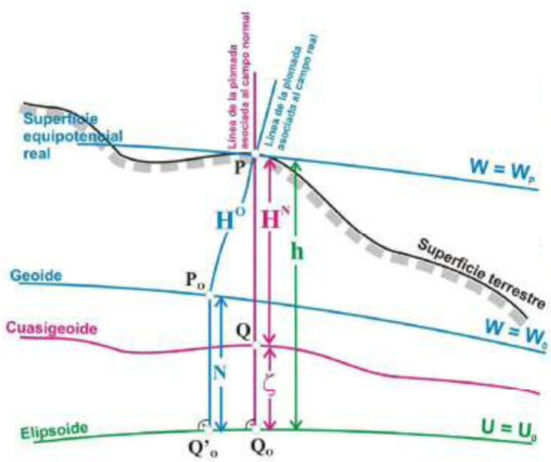
SIRGAS — **Alturas físicas en SIRGAS**

SIRGAS recomienda oficialmente la adopción de **alturas normales**; sinembargo, algunos países quieren introducir alturas ortométricas. De allí, se ha acordado el **ajuste de las líneas de nivelación en términos de números geopotenciales** y luego cada país hará la conversión al tipo de alturas físicas (normales u ortométricas) que estime conveniente.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Superfícies de referência

SIRGAS — **Superficies de referencia**



Alturas elipsoidales
⇒ **Elipsoide (h=0)**

Alturas ortométricas
⇒ **Geoide (H^O=0)**

Alturas normales
⇒ **Cuasigeoide (H^N=0)**

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

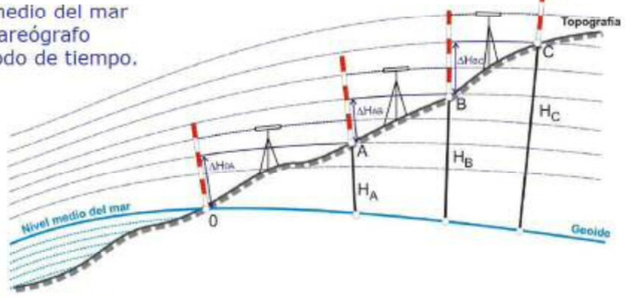
Sistemas Verticais Nacionais

SIRGAS — **Sistemas de alturas clásicos**

Superficie de referencia:

Definición: el geoide (superfície equipotencial do campo de gravidade que coincide com o nível médio não perturbado dos mares)

Realización: nivel medio del mar registrado en un mareógrafo durante cierto período de tiempo.



Coordenadas:

Definición: alturas ortométricas.

Realización: nivelación geodésica de primer orden con reducciones por efectos del campo de gravedad terrestre. (classicamente através das correções normais-ortométricas)

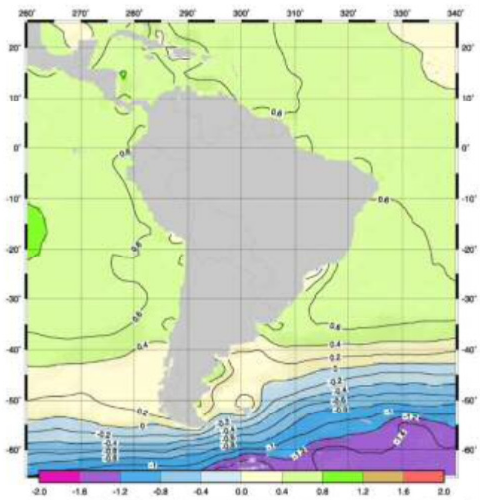
(fonte: adaptado da Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistemas Verticais Nacionais

SIRGAS — **Problema 1: Geoide ≠ superficie del mar**

La diferencia entre el nivel medio del mar y el geoide se conoce como **topografía de la superficie del mar** (SSTop). Sus magnitudes varían entre **-2 m y +2 m** a nivel global.

La SSTop permite identificar las discrepancias existentes entre el nivel medio del mar registrado en dos puntos diferentes. Por ejemplo, en el mareógrafo de referencia de Brasil (Imbituba) la SSTop es de 20 cm, mientras que en el de Colombia (Buenaventura) es de 60 cm, es decir que estos dos niveles de referencia tienen una discrepacia de 40 cm, sólo por la variación del nivel medio del mar de un lugar a otro.

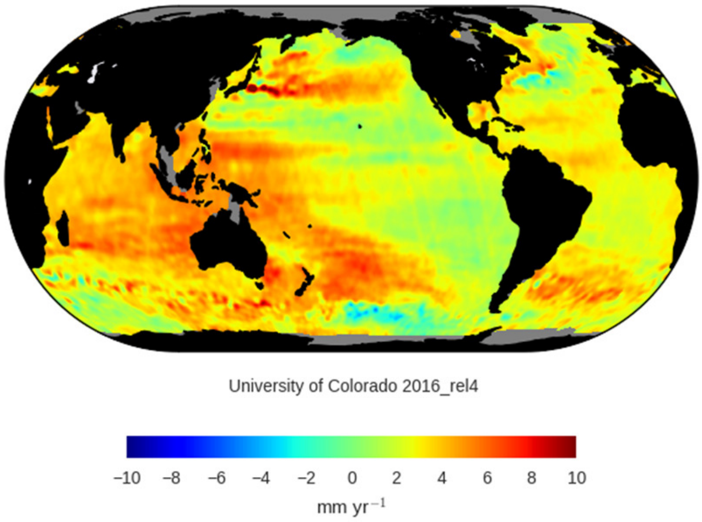


SSTop [m] (T/P), 1992-2000 (W. Bosch, DGFI)

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistemas Verticais Nacionais

Problema 2: Omisión de los cambios del nivel del mar em función de la ubicación geográfica



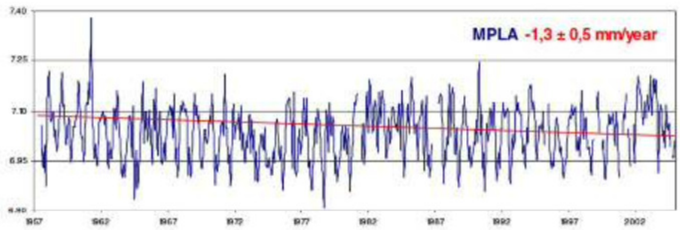
(fonte: adaptado de Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistemas Verticais Nacionais

SIRGAS

Problema 3: Omisión de los cambios del nivel del mar en función del tiempo

Mareógrafo Mar del Plata (Argentina):



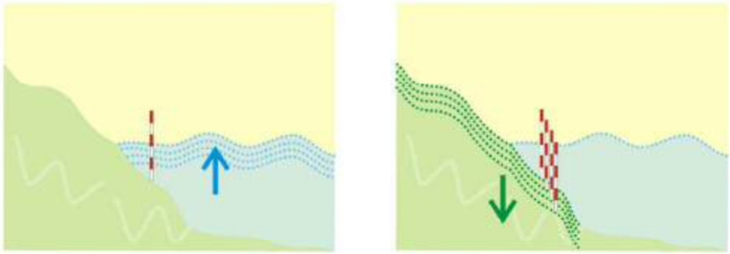
El nivel medio del mar registrado en la década de los anos 50 (época de definición del nivel cero) estaba 7 cm "más arriba" que el nivel actual.

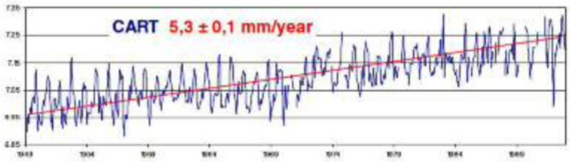
Es decir, el nivel registrado en un mareógrafo de referencia durante el período de definición, no es el mismo que se registraría si se tomara otra época para definir la altura cero en ese mismo mareógrafo.

(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Sistemas Verticais Nacionais

Problema 4: Variación del nivel del mar o movimiento vertical de la corteza?

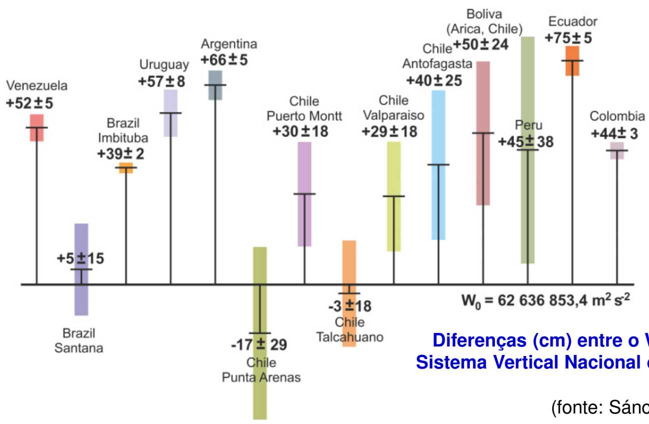




(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

Unificação de Sistemas Verticais

- **Unificação regional**: Sistema de Referência Vertical do **SIRGAS**
  - Em desenvolvimento no âmbito da América Latina desde 1997 com o **GT III**
  - Referido a um **nível de referência global W0**
  - Realizado por **altitudes físicas** adequadas
  - Conectado à **componente geométrica** (≡ altitudes elipsoidais) do SIRGAS
  - Associado a uma **época de referência** específica



Diferenças (cm) entre o W de referência de cada Sistema Vertical Nacional da América do Sul e o W0

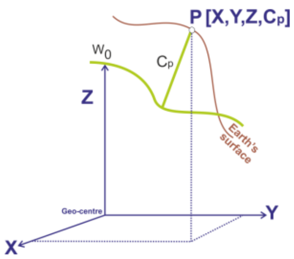
(fonte: Sánchez, 2016)

Unificação de Sistemas Verticais

- **Unificação global:**

International Height Reference System (IHRS)
Resolución IAG No. 1, julio 2015

1) Las coordenadas verticales son diferencias de potential con respecto a un valor W_0 convencional:
   - $C_P = C(P) = W_0 - W(P) = -\Delta W(P)$
   - valor convencional de referencia $W_0 = const. = 62\ 636\ 853.4\ m^2s^{-2}$
2) La posición P está dada por el vector geocéntrico $\mathbf{X}_P$ (X_P, Y_P, Z_P) en el ITRF, i.e. $W(P) = W(\mathbf{X}_P)$



3) La determinación de $\mathbf{X}(P)$, $W(P)$ (or $C(P)$) incluye su variación en el tiempo, i.e., $\dot{\mathbf{X}}(P)$, $\dot{W}(P)$ (or $\dot{C}(P)$).

$\mathbf{X}(P)$ se estima con el ITRF (SIRGAS en América Latina), $C(P)$ es la diferencia W_0-$W(P)$, como W_0 es constante y adoptado convencionalmente, la tarea inminente es la determinación precisa de $W(P)$: Presición esperada:

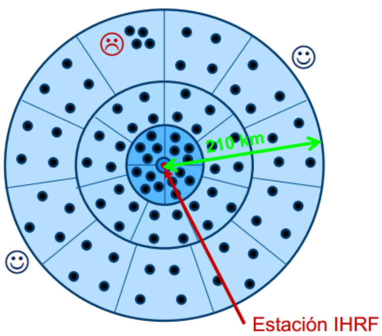
- Posiciones: 3×10^{-2} m^2s^{-2} (3 mm)
- Velocidades: 3×10^{-3} m^2s^{-2}/a (0.3 mm/a).

(fonte: Sánchez, 2016)

Unificação de Sistemas Verticais

- **Unificação global:**

Ejemplo de la distribución de puntos gravimétricos al rededor de las estaciones IHRF



Plantilla según la contribución de los efectos gravimétricos al geoide ($\Delta g = 1\cdot10^{-6}$ $ms^{-2} \rightarrow 1$ mm)		
Distancia	Celdas	No. de puntos **plano/montaña**
10 km	1	**4/8**
50 km	4	**20/30**
110 km	7	**30/45**
210 km	11	**50/75**
Total	23	**104/158**

(fonte: Sánchez, 2016)

Unificação de Sistemas Verticais

- **Unificação global/regional:**

Contribución/integración de SIRGAS en el IHRS/IHRF

1) Establecimiento de estaciones IHRS en la Región SIRGAS:
   - Selección de algunas estaciones SIRGAS de operación continúa en cada país.
   - Se prefieren estaciones materializadas por pilares o trípodes permanentes empotrados directamente en el suelo. Antenas GNSS ubicadas en edificios altos (más de dos pisos) no son aconsejables.
   - Levantamiento gravimétrico alrededor de las estaciones SIRGAS seleccionadas: 158 puntos de gravedad distribuídos homogéneamente alrededor de la estación hasta una distancia máxima aproximada de 200 km.
   - La posición de los puntos gravimétricos debe estimarse con posicionamiento GPS (precision en cm es suficiente).
   - En zonas de actividad sísmica (los Andes, Centro América) conviene la identificación (o materialización) precisa de los puntos gravimétricos a fín de facilitar levantamientos gravimétricos repetitivos.
   - Se recomienda que los levantamientos gravimétricos relativos se apoyen directamente en una estación de gravedad absoluta.
   - La cantidad de estaciones SIRGAS seleccionadas por cada país para conformar el IHRF depende de las capacidades nacionales disponibles. Si dichas capacidades son muy limitadas conviene hacer el esfuerzo por incluir al menos una estación por país.
   - La distribución de las estaciones debe ser más o menos homogénea sobre toda la Región SIRGAS.

(fonte: Sánchez, 2016)

Unificação de Sistemas Verticais

- **Unificação global/regional:**

Contribución/integración de SIRGAS en el IHRS/IHRF

2) Integración (unificación) de los sistemas de alturas existentes al IHRS/IHRF
   - Nivelación geodésica (junto con gravimetría) de estaciones SIRGAS de operación continua. Ideal si las estaciones seleccionadas para el IHRF son niveladas.
   - Posicionamiento GNSS preciso en los mareógrafos de referencia: algunos ocupados durante SIRGAS2000, otros con estación SIRGAS de operación continua. En el primer caso se necesitan ocupaciones repetitivas para determinar las velocidades en la estación SIRGAS2000. En ambos casos se requiere el desnivel entre mareógrafo y estación GNSS.
   - Conexión de las redes verticales de países vecinos por medio de nivelación geodésica.
   - Combinación de alturas elipsoidales, números geopotenciales, registros mareográficos, observaciones de altimetría satelital y modelado detallado del campo de gravedad terrestre.

3) Participación activa y efectiva en las actividades del Grupo de Trabajo 3 (Datum vertical) :

(fonte: Sánchez, 2016)

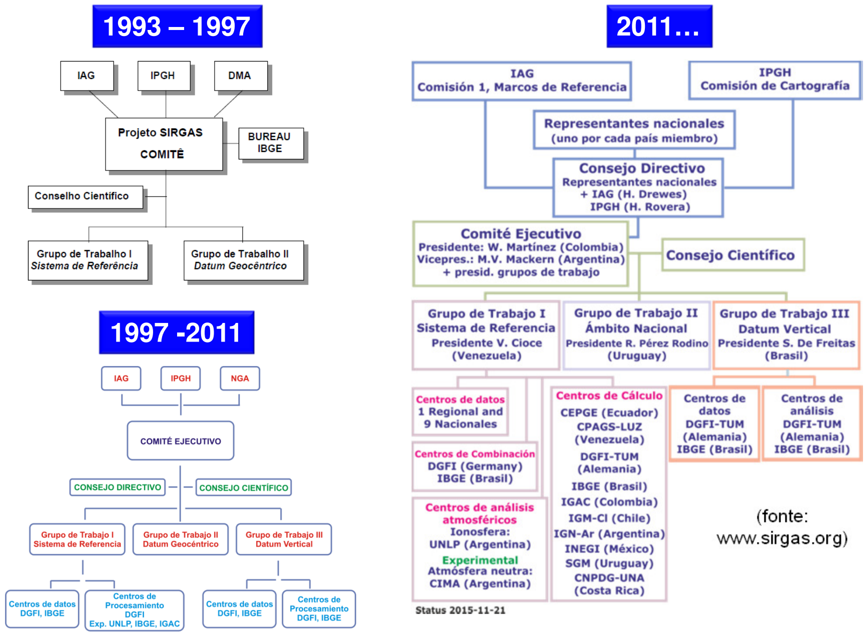
3. Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS

SIRGAS

- **"Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul"** (1993-2001)
- "**Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas"** (2001-…)
- Subcomissão 1.3b da IAG: Reference Frames / Regional Reference Frames / South and Central America
- Grupo de Trabalho da Comissão de Cartografia do IPGH
- **SIRGAS**, como **sistema de referência**, é definido de forma idêntica ao *International Terrestrial Reference System (ITRS)*
- **SIRGAS**, como **estrutura de referência**, é uma densificação regional do *International Terrestrial reference Frame (ITRF)*

161

Estrutura do SIRGAS

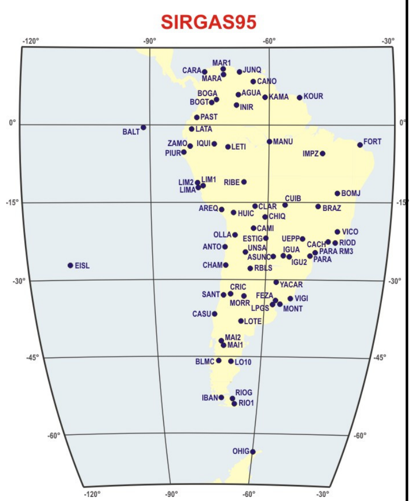


(fonte: www.sirgas.org)

1ª Campanha SIRGAS (1995)

- Das **00:00h** (TU) de **26 mai 95** às **24:00hs** (TU) de **04 jun 95**
- 58 estações
- 30 instituições
- 11 países
- 3 centros de processamento

Argentina	10
Bolivia	6
Brasil	11
Chile	8
Colombia	5
Ecuador	3
Guiana Fr.	1
Paraguay	2
Perú	4
Uruguay	3
Venezuela	5
TOTAL	**58**



(fonte: www.sirgas.org)

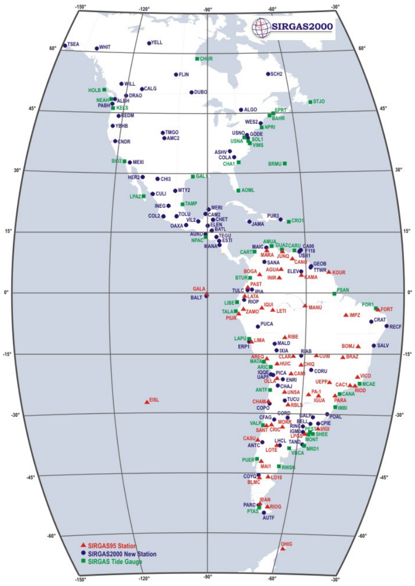
"Um projeto extremamente bem executado"
Wolfgang Torge, Presidente da IAG, XXI Assembleia Geral da UGGI 1995, Boulder

2ª Campanha SIRGAS (2000)

- Das **00:00h** (TU) de **10 mai 2000** às **24:00hs** de **19 mai 2000**
- 184 estações
- 24 países

Table 1. Distribution and types of stations in the countries

Country (Island)	SIRGAS 1995	New Site	Tide Gauge	Total No.
Argentina	10	7	3	20
Bermuda	-	-	1	1
Bolivia	6	3	-	9
Brazil	11	5	5	21
Canada	-	10	3	13
Chile	7	8	5	20
Colombia	5	2	1	8
Ecuador	3	3	1	7
Fr. Guiana	1	-	-	1
Guatemala	-	3	1	4
Guyana	-	2	-	2
Honduras	-	1	-	1
Jamaica	-	1	-	1
Mexico	-	13	2	15
Nicaragua	-	2	-	2
Paraguay	1	-	-	1
Puerto Rico	-	1	-	1
Saint Croix	-	-	1	1
Peru	4	3	3	10
Trinidad&Tobago	-	2	-	2
Uruguay	2	4	2	8
USA	-	12	12	24
Venezuela	5	3	3	11
Antarctica	1	-	-	1
Sum	56	85	43	184



(fonte: www.sirgas.org)

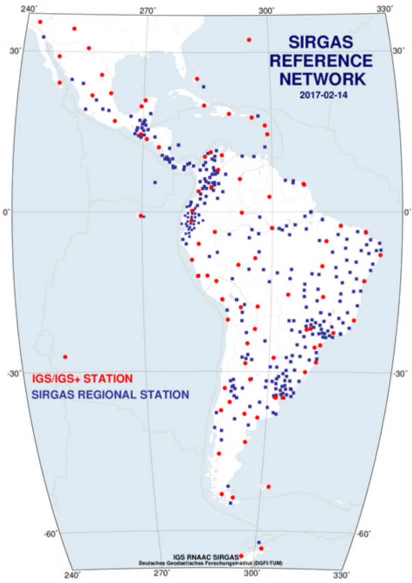
Realização SIRGAS2000

Diferenças entre as soluções individuais e a solução combinada final

	Norte	Este	Altitude
IBGE	± 2.6 mm	± 3.6 mm	± 7.8 mm
DGFI	± 2.6 mm	± 3.7 mm	± 7.0 mm
BEK	± 2.2 mm	± 4.0 mm	± 6.8 mm

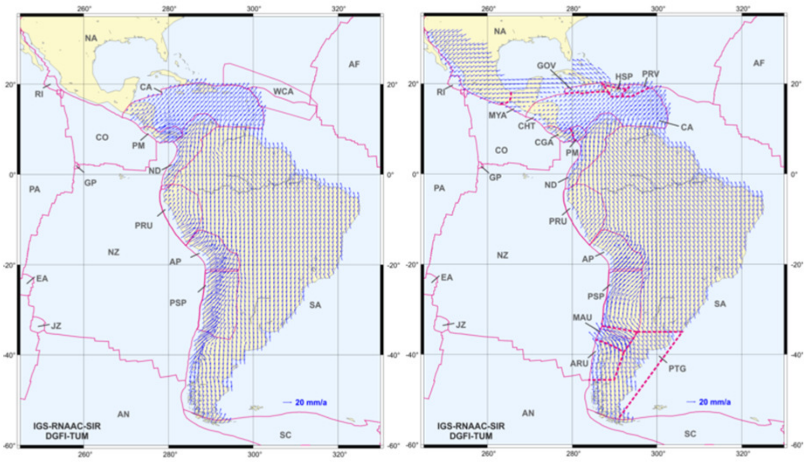
Rede SIRGAS-CON

- Rede SIRGAS de estações de operação contínua
- Implementa a realização do SIRGAS após 2000
- Rede de estações GNSS com coordenadas determinadas com grande precisão (referidas a uma determinada época) e sua variação no tempo (i.e., com velocidades conhecidas)
- Novembro de 2016: ~400 estações, sendo 59 do IGS



(fonte: www.sirgas.org)

Modelos de velocidade para a América do Sul e Caribe



VEMOS2009 (esquerda) referido ao ITRF2005 (Drewes and Heidbach, 2012), e VEMOS2015 (direita) referido ao IGb08 (Sánchez and Drewes, 2016)

(fonte: www.sirgas.org)

Adoção do Marco de Referência SIRGAS

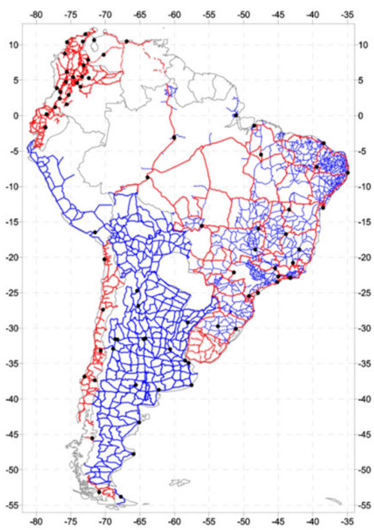
- Resolução 4 da 7ª UNRCC-A (2001) recomendou a adoção de um marco de referência compatível com SIRGAS pelos países das Américas
- Resolução 7 da 8ª UNRCC-A recomendou a integração dos países da América Central e Caribe ao SIRGAS
- SIRGAS deu suporte à solução do conflito de fronteiras entre Ecuador e Perú, o mais longo das Américas (desde 1800s!)
- Atualmente: 20 países membros
  - América do Sul: 12
  - América Central : 6
  - América do Norte: 1
  - Caribe: 1

País	Marco de Referência Nacional
Argentina	ITRF2005, época 2006.6
Bolívia	SIRGAS95, época 1995.4
Brasil	SIRGAS2000, época 2000.4
Chile	SIRGAS2000, época 2002.0
Colombia	SIRGAS95, época 1995.4
Costa Rica	ITRF2000, época 2005.8
Ecuador	SIRGAS95, época 1995.4
El Salvador	SIRGAS, época 2007.8
Guiana Francesa	ITRF93, época 1995.0
Guatemala	SIRGAS
México	ITRF2008, época 2010.0
Panamá	SIRGAS2000, época 2000.0
Perú	SIRGAS95, época 1995.4
Uruguay	SIRGAS95, época 1995.4
Venezuela	SIRGAS95, época 1995.4

(fonte: www.sirgas.org)

Sistema de Referência Vertical SIRGAS

- Baseado em uma componente geométrica (altitudes elipsoidais SIRGAS) e uma componente física (W_0 como nível de referência e números geopotenciais como coordenadas primárias)
- Referido ao nível de referência global W_0
- Dado por altitudes físicas (derivadas de nivelamento geodésico combinado com reduções gravimétricas)
- Associado a uma época de referência específica



(fonte: Brunini et al. 2011, www.sirgas.org)

PMRG

O Projeto Mudança do Referencial Geodésico **(PMRG)** promoveu a adoção no país do sistema de referência **SIRGAS2000**:

- Geocêntrico
- Compatível com sistemas globais e continentais ⇒ coordenadas consistentes com as dos países vizinhos
- Compatível com as mais modernas tecnologias de posicionamento baseadas nos sistemas GNSS
- Base para a unificação das informações geoespaciais produzidas no país

Obs.: De 2004 a 2009 contou com o apoio do Canadá através do projeto **PIGN** (CIDA/ABC)

Cronograma

Data	Ação
2000	Criação do PMRG[1]
2003	Definição do Sistema de Referência
25/02/2005	Início do Período de Transição[2] (convivência entre os sistemas antigos e o SIRGAS2000)
25/02/2015	Adoção definitiva do novo sistema[3]

1: I Seminário sobre Referencial Geocêntrico no Brasil
2: RPR 01/2005, em desdobramento ao II Seminário sobre Referencial Geocêntrico no Brasil (de 30/11 a 03/12/2004)
3: RPR 01/2015

Legislação que suportou a adoção do SIRGAS2000

Decreto Nº 5334/2005, de 06/01/2005
Altera a redação do Art. 21, do decreto Nº 89.817
"Os referenciais planimétrico e altimétrico para a Cartografia Brasileira são aqueles que definem o Sistema Geodésico Brasileiro - SGB, **conforme estabelecido pelo IBGE**, em suas especificações e normas"

RPR 01/2005, de 25/02/2005, e RPR 04/2012, de 18 de abril de 2012
"Estabelece o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS, em sua realização do ano de 2000 - SIRGAS2000, como novo sistema geodésico de referência para o Sistema Geodésico Brasileiro - SGB e para o Sistema Cartográfico Nacional - SCN"

RPR 01/2015, de 24/02/2005
"Define a data de término do período de transição definido na RPR 01/2005 e dá outras providências sobre a transformação entre os referenciais geodésicos adotados no Brasil"

SIRGAS2000 adotado no Brasil

Época de Referência: 2000,4

Elipsóide: GRS80

Semi-eixo maior: 6.378.137 m

Achatamento: 1/298,257222101

Origem: Centro de Massa da Terra

Desde a semana GPS 1150, o WGS84 é compatível com o SIRGAS2000

Período de Transição

- Intervalo de tempo durante o qual o SIRGAS2000 e os sistemas anteriores (SAD 69 e Córrego Alegre) podiam ser oficialmente utilizados, proporcionando ao usuário a possibilidade de adequação e ajuste de suas bases de dados, métodos e procedimentos ao novo sistema
- Adoção não era obrigatória, mas **recomendada**
- Término do período de transição: **25/02/2015**

Principais dados, informações, ferramentas e serviços disponibilizados aos usuários no período de transição

- **Coordenadas SIRGAS2000** para todas as estações planimétricas da rede geodésica disponibilizadas no Banco de Dados Geodésicos na Internet
- **RBMC** ampliada, modernizada e potencializada com estações operando em tempo real (RBMC-IP)
- Posicionamento por Ponto Preciso **(PPP)**
- Programas de transformação de coordenadas **TCGeo** e **ProGriD**
- **Modelo geoidal** referido ao SIRGAS2000 (última versão: MAPGEO2015)

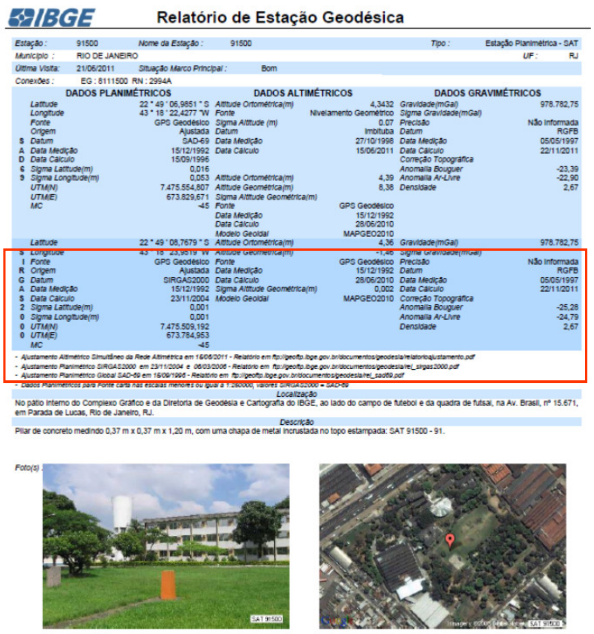
O que mudou com o término do Período de Transição

- Todos os usuários no Brasil devem adotar **exclusivamente** o **SIRGAS2000** em suas atividades, encerrando-se o uso concomitante do SAD 69 no Sistema Geodésico Brasileiro e do SAD 69 e Córrego Alegre no Sistema Cartográfico Nacional
- IBGE passou a publicar em seu **Banco de Dados Geodésicos** as coordenadas das estações referidas **apenas ao SIRGAS2000**
- **MAPGEO** referido **apenas ao SIRGAS2000**

Obs: a RPR 01/2015 formaliza ainda os procedimentos para transformação de coordenadas referidas a **Córrego Alegre 1961**, **Córrego Alegre 1970+1972**, **SAD 69**, **SAD 69/96**, e **WGS 84** para o **SIRGAS2000**

Banco de Dados Geodésicos (Período de transição)

(fonte: IBGE)


IBGE Relatório de Estação Geodésica

Estação : 91500 Nome da Estação : 91500 Tipo : Estação Planimétrica - SAT
Município : RIO DE JANEIRO UF : RJ
Última Visita: 21/06/2011 Situação Marco Principal : Bom
Conexões : EG : 8111500 RN : 2994A

	DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
	Latitude	22 ° 49 ' 06,9851 " S	Altitude Ortométrica(m)	4,3432	Gravidade(mGal)	978.782,75
	Longitude	43 ° 18 ' 22,4277 "W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
	Fonte	GPS Geodésico	Sigma Altitude (m)	0.07	Precisão	Não Informada
	Origem	Ajustada	Datum	Imbituba	Datum	RGFB
S	Datum	SAD-69	Data Medição	27/10/1998	Data Medição	05/05/1997
A	Data Medição	15/12/1992	Data Cálculo	15/06/2011	Data Cálculo	22/11/2011
D	Data Cálculo	15/09/1996			Correção Topográfica	
6	Sigma Latitude(m)	0,016			Anomalia Bouguer	-23,39
9	Sigma Longitude(m)	0,053	Altitude Ortométrica(m)	4,39	Anomalia Ar-Livre	-22,90
	UTM(N)	7.475.554,807	Altitude Geométrica(m)	8,38	Densidade	2,67
	UTM(E)	673.829,671	Sigma Altitude Geométrica(m)			
	MC	-45	Fonte	GPS Geodésico		
			Data Medição	15/12/1992		
			Data Cálculo	28/06/2010		
			Modelo Geoidal	MAPGEO2010		
	Latitude	22 ° 49 ' 08,7679 " S	Altitude Ortométrica(m)	4,36	Gravidade(mGal)	978.782,75
S	Longitude	43 ° 18 ' 23,9519 " W	Altitude Geométrica(m)	-1,46	Sigma Gravidade(mGal)	
I	Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	Não Informada
R	Origem	Ajustada	Data Medição	15/12/1992	Datum	RGFB
G	Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	28/06/2010	Data Medição	05/05/1997
A	Data Medição	15/12/1992	Sigma Altitude Geométrica(m)	0,002	Data Cálculo	22/11/2011
S	Data Cálculo	23/11/2004	Modelo Geoidal	MAPGEO2010	Correção Topográfica	
2	Sigma Latitude(m)	0,001			Anomalia Bouguer	-25,28
0	Sigma Longitude(m)	0,001			Anomalia Ar-Livre	-24,79
0	UTM(N)	7.475.509,192			Densidade	2,67
0	UTM(E)	673.784,953				
	MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sad69.pdf
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

Localização

No pátio interno do Complexo Gráfico e da Diretoria de Geodésia e Cartografia do IBGE, ao lado do campo de futebol e da quadra de futsal, na Av. Brasil, nº 15.671, em Parada de Lucas, Rio de Janeiro, RJ.

Descrição

Pilar de concreto medindo 0,37 m x 0,37 m x 1,20 m, com uma chapa de metal incrustada no topo estampada: SAT 91500 - 91.

Foto(s)

Banco de Dados Geodésicos (após 25 fev 2015)

(fonte: IBGE)

IBGE Relatório de Estação Geodésica

Estação :	91500	*Nome da Estação :*	91500	*Tipo :*	Estação GPS
Município :	RIO DE JANEIRO			*UF :*	RJ
Última Visita:	21/06/2011	*Situação Marco Principal :*	Bom		
Conexões :	EG : 8111500 RN : 2994A				

DADOS PLANIALTIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22 ° 49 ' 08,7679 " S	*Altitude Ortométrica(m)*	4,3432	*Gravidade(mGal)*	978.782,75
Longitude	43 ° 18 ' 23,9519 "W	*Fonte*	Nivelamento Geométrico	*Datum*	RGFB
Altitude Geométrica(m)	-1,460	*Sigma Altitude(m)*	0.07	*Data Medição*	05/05/1997
Fonte	GPS Geodésico	*Datum*	Imbituba	*Data Cálculo*	22/11/2011
Origem	Ajustada	*Data Medição*	27/10/1998		
Datum	SIRGAS2000	*Data Cálculo*	15/06/2011		
Data Medição	15/12/1992				
Data Cálculo	23/11/2004				
Sigma Latitude(m)	0,001				
Sigma Longitude(m)	0,001				
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,002				
UTM(N)	7.475.509,192				
UTM(E)	673.784,953				
MC	-45				

- *Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf*
- *Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf*
- *Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2010 disponível em http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm*
- *As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015.*

Localização

No pátio interno do Complexo Gráfico e da Diretoria de Geodésia e Cartografia do IBGE, ao lado do campo de futebol e da quadra de futsal, na Av. Brasil, nº 15.671, em Parada de Lucas, Rio de Janeiro, RJ.

Descrição

Pilar de concreto medindo 0,37 m x 0,37 m x 1,20 m, com uma chapa de metal incrustada no topo estampada: SAT 91500 - 91.

Foto(s)

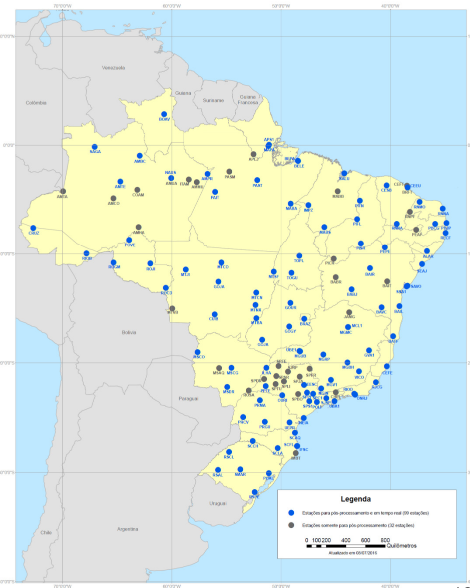
IBGE

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Diretoria de Geociências - DGC
Coordenação de Geodésia - CGED

REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS

- Primeira rede de operação contínua (= ativa) GPS implantada na América do Sul
- 20 anos em operação
- 129 estações em operação para pós-processamento e 99 em tempo real (RBMC-IP) (ref. nov 2016)
- Receptores GNSS operando 24h/7 dias da semana
- >400.000 downloads por mês
- Dados disponibilizados para livre acesso nos portais do IBGE e INCRA
- Cooperação com mais de 40 instituições
- Materializa o SIRGAS no Brasil!

(fonte: IBGE)



128

Estações RBMC

(fonte: IBGE)

129

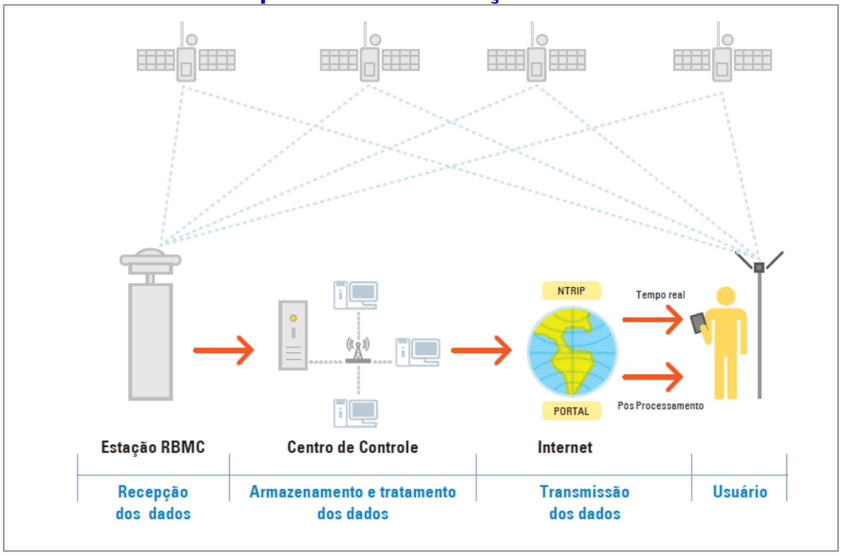
Serviço RBMC-IP

- Disponibiliza fluxo de dados, efemérides e correções GNSS das estações da RBMC-IP através do protocolo TCP/IP, possibilitando a realização de levantamentos RTK
- Utiliza o **NTRIP** - **N**etworked **T**ransport of **R**TCM via **I**nternet **P**rotocol (desenvolvido pela Agência Alemã de Geodésia e Cartografia)
- Possibilita a integração de dados a partir de diferentes receptores na transmissão em tempo real (formato RTCM 3.0)
- Banda necessária para a transmissão dos dados é de 0,5 Kbps (DGPS) e 3 Kbps (RTK) por estação

(fonte: IBGE)

RBMC-IP

Componentes do serviço RBMC-IP



(fonte: IBGE)

Motivação do serviço RBMC-IP

- Padronização do formato de arquivos para transmissão em tempo real (RTCM)
- Crescimento da Internet móvel
- Receptores mais modernos com firmware capaz de realizar RTK via NTRIP

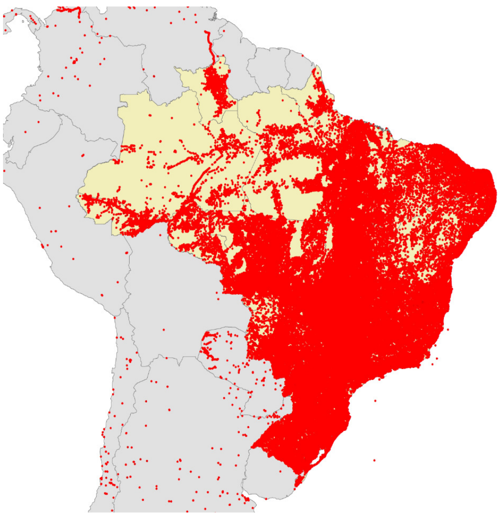
Acesso ao serviço RBMC-IP

- Acesso aos dados é feito via cadastro (usuário não está diretamente conectado ao receptor)
- Permissão de acesso para 5 estações, no máximo
- Acessível através do endereço: http://186.228.51.52:2101
- Software livre para cálculo: RTKLIB, BNC

(fonte: IBGE)

Serviço IBGE-PPP

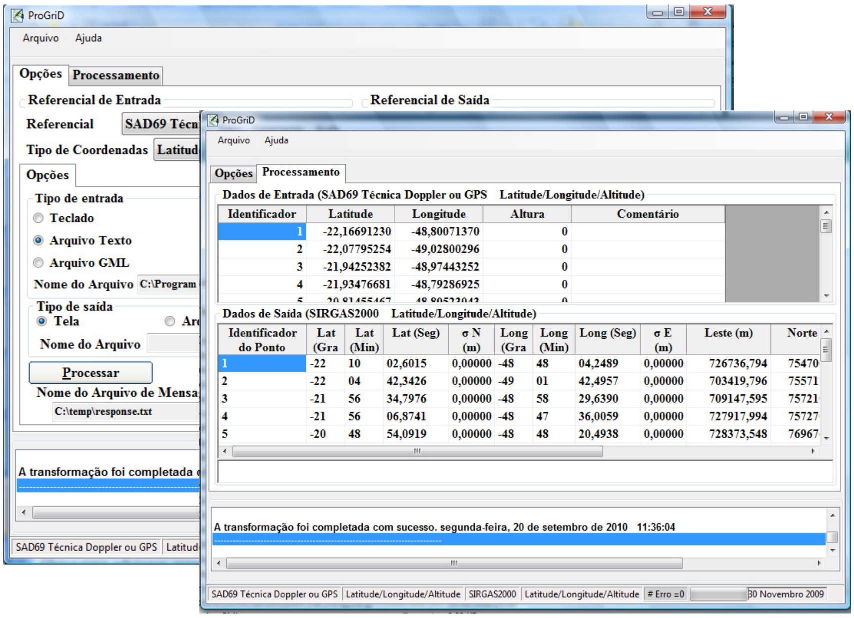
Serviço IBGE-PPP



Distribuição espacial dos resultados

- Em operação desde april 2009
- Usa a ferramenta CSRS-PPP, desenvolvida pela Geodetic Survey Division do Natural Resources Canada (NRCan)
- Coordenadas planimétricas referidas ao SIRGAS2000 – propagadas à época 2000,4 usando o modelo VEMOS2009
- Resultados GPS estáticos e cinemáticos disponíveis 2:30h após o levantamento
- Resultados GPS&GLONASS 36h após o levantamento
- ~15,000 processamentos por mês

ProGriD – Programa de Transformação de Coordenadas



Parâmetros de transformação

- Parâmetros de transformação de SAD 69 para SIRGAS2000/ WGS84(G1762)

SAD 69 $\rightarrow$ SIRGAS2000 / WGS 84(G1762)

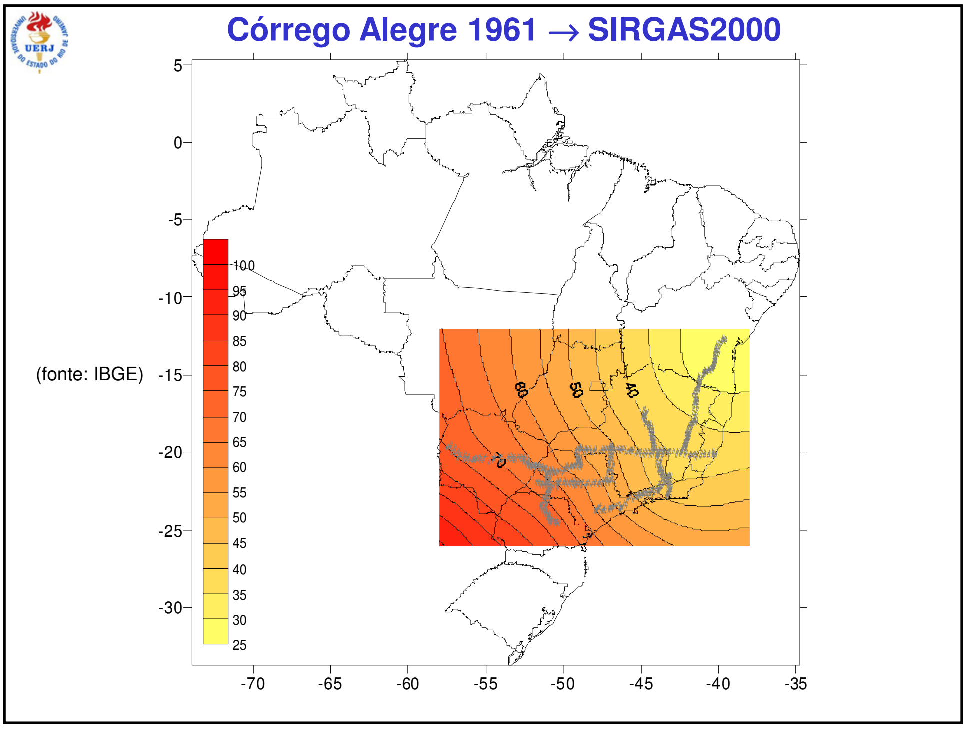
ΔX = - 67,35 m
ΔY = 3,88 m
ΔZ = - 38,22 m

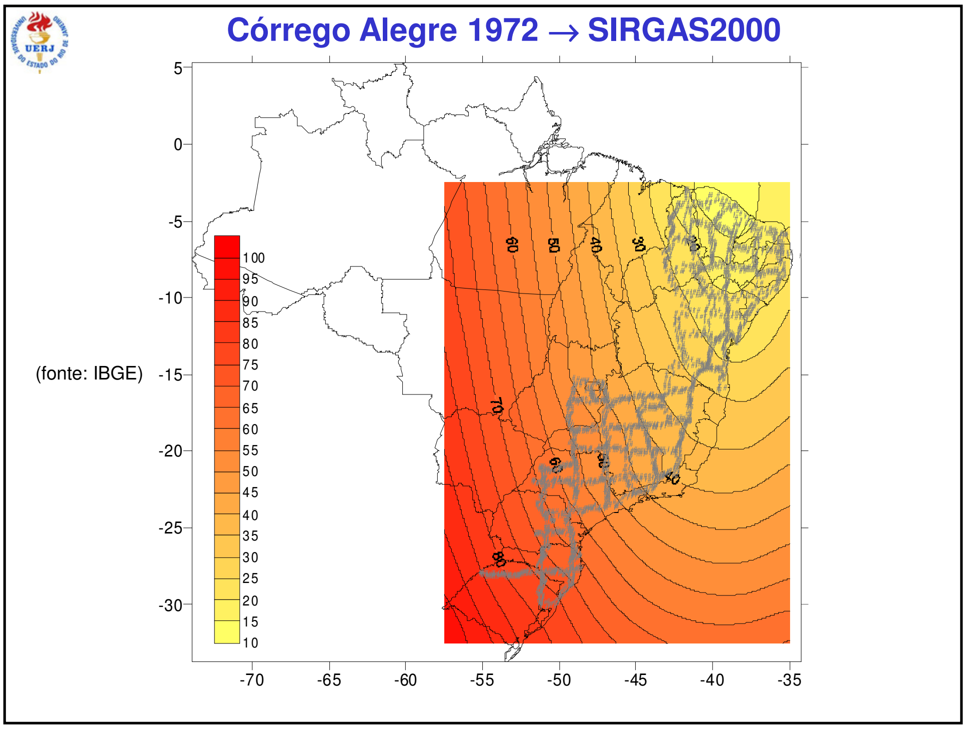
Obs: Não existem parâmetros de transformação de WGS 84(G1150) ou WGS 84(G1762) para SIRGAS2000, pois são coincidentes do ponto de vista prático

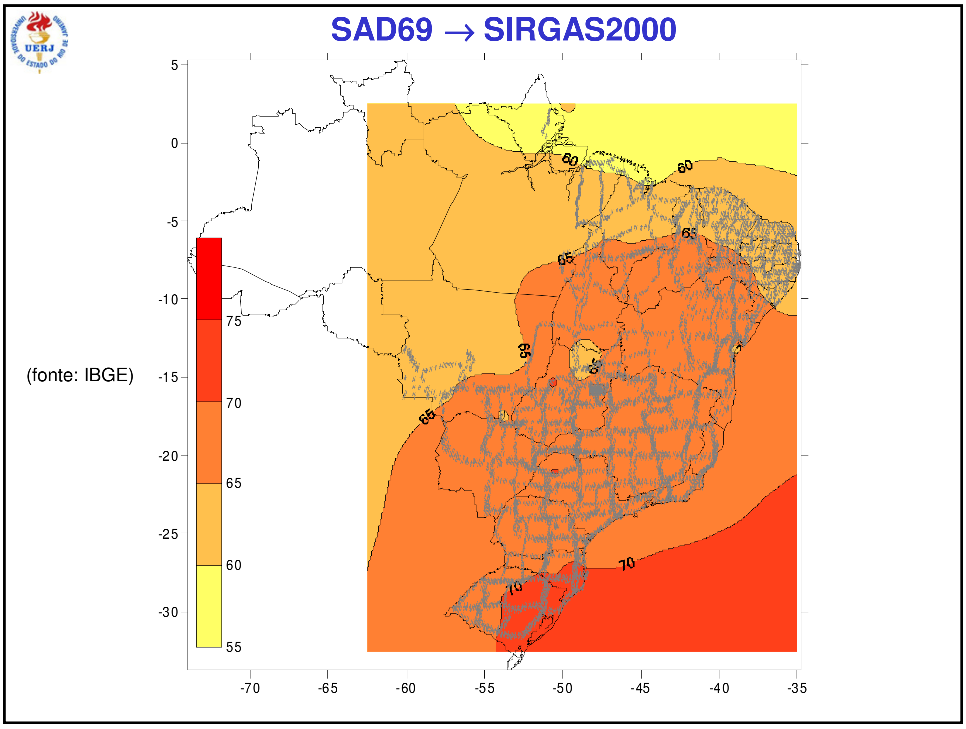
- Parâmetros de transformação calculados em 1989(RPR 23/89), usados para transformar SAD 69 para WGS 84 (Doppler)
  - ✓ Acurácia pior que 0,40 m
  - ✓ Devem ser usados em levantamentos até 31/12/93

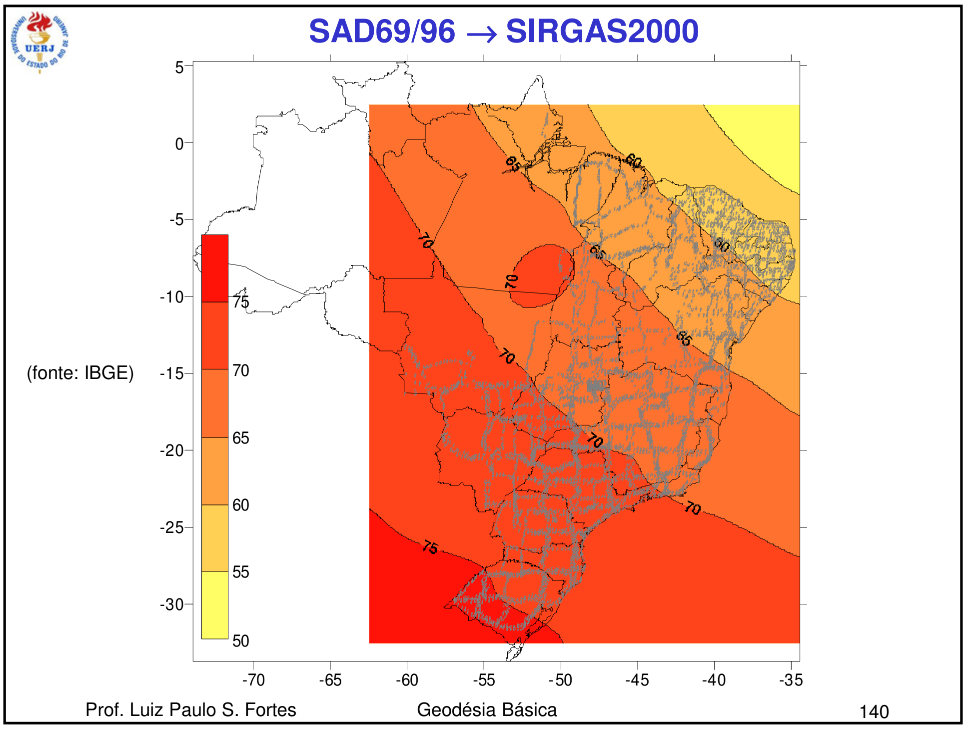
SAD 69 $\rightarrow$ WGS 84 (Doppler)

ΔX = - 66,87 m
ΔY = 4,37 m
ΔZ = - 38,52 m

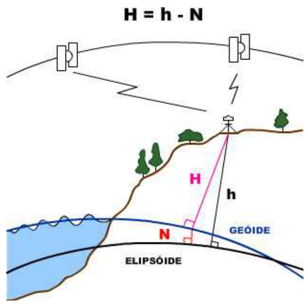

Córrego Alegre 1961 → SIRGAS2000
(fonte: IBGE)

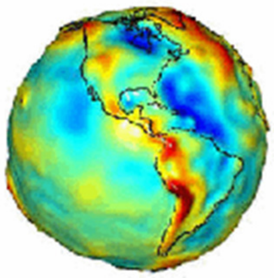

Córrego Alegre 1972 → SIRGAS2000
(fonte: IBGE)

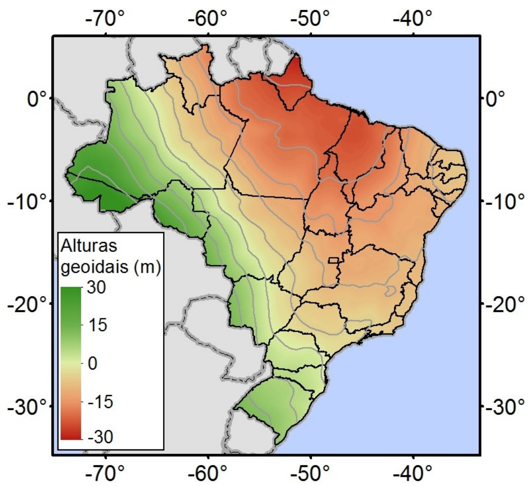

SAD69 → SIRGAS2000
(fonte: IBGE)
75
70
65
60
55


SAD69/96 → SIRGAS2000
(fonte: IBGE)
75
70
65
60
55
50
Prof. Luiz Paulo S. Fortes
Geodésia Básica
140

Modelo de Ondulação Geoidal – MAPGEO2015







(fonte: IBGE)

4. Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS)

- Fundamentos do posicionamento
- Planejamento de campanhas
- Redes geodésicas ativas
- Posicionamento pós-processado e em tempo real (relativo e PPP)
- Posicionamento vertical com GNSS

GEOMATICS ENGINEERING

SCHULICH School of Engineering

UNIVERSITY OF CALGARY

UNIVERSITY OF CALGARY

Department of Geomatics Engineering

ENGO 465
Satellite Positioning
Winter 2013

Lecture Notes

By Mark G. Petovello

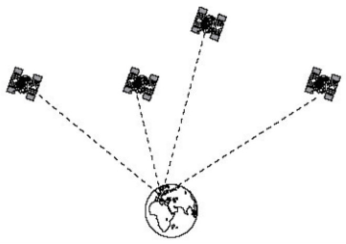
UERJ UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Adaptado para a UERJ por Luiz Paulo S. Fortes
(versão resumida)

1

Satellite Positioning – The Basic Concept

- Satellite positioning is fundamentally based on the concept of trilateration
  - Measure distances to known points in order to determine your position
- There are four unknown parameters (4D system)
  - Position (Y,X,Z or latitude, longitude, height) and time
  - Need four observations in order to compute a 3D position fix
- Biggest difference from terrestrial-based positioning is that the known/control points to which we are measuring are moving in space
  - Orbital velocity is approximately 4 km/s
  - Measurement geometry is continually changing

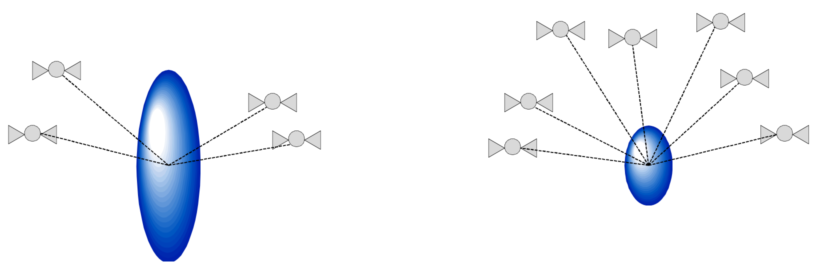


Satellite Geometry

- More generally, as the satellite geometry improves, the uncertainty area becomes more spherical (less elliptical)

Good Horizontal Geometry, but Poor Vertical Geometry

Good Horizontal and Vertical Geometry



Satellite geometry must always be monitored to ensure that accuracy requirements can be met!

Estimated Accuracy and DOPs

- The covariance matrix of the estimated parameters is given by

$$C_{\hat{x}} = \sigma_P^2 \underbrace{\left(A^T A\right)^{-1}}_{Q_x} = \sigma_P^2 \begin{bmatrix} q_{x,x} & q_{x,y} & q_{x,z} & q_{x,cdt} \\ q_{y,x} & q_{y,y} & q_{y,z} & q_{y,cdt} \\ q_{z,x} & q_{z,y} & q_{z,z} & q_{z,cdt} \\ q_{cdt,x} & q_{cdt,y} & q_{cdt,z} & q_{cdt,cdt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{x,y} & \sigma_{x,z} & \sigma_{x,cdt} \\ \sigma_{y,x} & \sigma_y^2 & \sigma_{y,z} & \sigma_{y,cdt} \\ \sigma_{z,x} & \sigma_{z,y} & \sigma_z^2 & \sigma_{z,cdt} \\ \sigma_{cdt,x} & \sigma_{cdt,y} & \sigma_{cdt,z} & \sigma_{cdt}^2 \end{bmatrix}$$

where Q is called the cofactor matrix and σ_P is the standard deviation of the pseudorange measurements. The diagonal elements of Q_x define what we call the Dilution of Precision (DOP) values, specifically

$$XDOP = \sqrt{q_{x,x}} \qquad YDOP = \sqrt{q_{y,y}} \qquad ZDOP = \sqrt{q_{z,z}} \qquad TDOP = \sqrt{q_{cdt,cdt}}$$

DOPs and Accuracy (1/2)

- The position accuracy can be then written as

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_P \times XDOP \\ \sigma_y &= \sigma_P \times YDOP \\ \sigma_z &= \sigma_P \times ZDOP \\ \sigma_{cdt} &= \sigma_P \times TDOP \end{aligned}\right\}$$

General formulation is:

$$\boxed{\text{Solution Accuracy} = \text{Measurement Accuracy} \times \text{DOP}}$$

Since the DOPs are computed from Q_x, which is related to the measurement geometry, the above equations show how the measurement geometry affects the solution accuracy.

Mission planning (pre-planning) is the process of determining when the DOPs are best for a particular area. What is needed in order to do this?

DOPs and Accuracy (2/2)

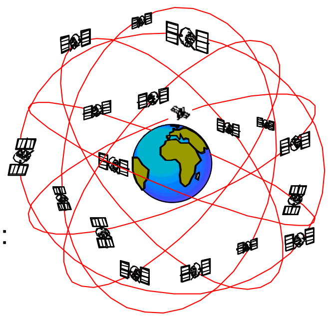
- By extension from the previous slide, we can compute DOP values for the 3D and 4D solutions as well

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$
$$= \sigma_P \times \sqrt{XDOP^2 + YDOP^2 + ZDOP^2}$$
$$= \sigma_P \times PDOP \longrightarrow \text{Position DOP}$$

$$\sigma_{4D} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_T^2}$$
$$= \sigma_P \times \sqrt{XDOP^2 + YDOP^2 + ZDOP^2 + TDOP^2}$$
$$= \sigma_P \times GDOP \longrightarrow \text{Geometric DOP}$$

GPS Characteristics

- Nominal constellation:
  - 24 satellites (31 in Mar 2017)
  - 6 orbital planes
  - 12-hour periods (sidereal)
  - 20,200 km altitude
- Worldwide, continuous coverage
- Line-of-sight, all weather system
- Currently transmits on three carrier frequencies:
  - L1 → f_{L1} = 1575.42 MHz → $\lambda_{L1} \cong 0.19$ m
  - L2 → f_{L2} = 1227.60 MHz → $\lambda_{L2} \cong 0.24$ m
  - L5 → f_{L2} = 1176.45 MHz → $\lambda_{L5} \cong 0.25$ m
- Frequency and time synchronized signals
- Two modulation codes for ranging
  - C/A and P codes
  - New ‘C’ and military codes on newer satellites (on L2)



Other GNSS (1/2)

- Global Navigation Satellite System (GLONASS)
  - Russian system which is similar to GPS
  - First launch in 1982 (three satellites launched at a time)
  - Currently 24 operational satellites
  - 3 orbital planes
  - 19,000 km altitude
- Galileo
  - Under development by the European Union
  - 3 orbital planes
  - 23,222 km altitude
  - Galileo Initial Services in Dec 2016
  - Currently 11 operational satellites, 2 in test (launched into wrong orbits), 4 under commissioning (Mar 2017)
  - Full Operational Capability (FOC) predicted by 2020
  - Similar to GPS with some additional signals and improvements in signal characteristics

Other GNSS (2/2)

- BeiDou
  - System currently under development by China
  - MEO satellites:
    - 24 satellites (nominal constellation); 6 SVs in Mar 2017
    - 3 orbital planes
    - 21,500 km altitude
  - Six frequencies and eight signals
  - Signal details released in late 2012
  - Final system is not expected until 2020
- Regional GNSS
  - Quazi-Zenith Satellite System – QZSS (Japan)
  - Indian Regional Navigation Satellite System – IRNSS (India)

GNSS Segments

- Any GNSS consists of three main segments
  - The space segment, which consists of the satellites and the signals they broadcast
  - The control segment, which monitors and manages the satellite operations
  - The user segment, which covers receiver development
- In the following slides, the above are discussed in the context of GPS, but the general concepts will apply to other systems as well

Informações sobre Constelações GNSS

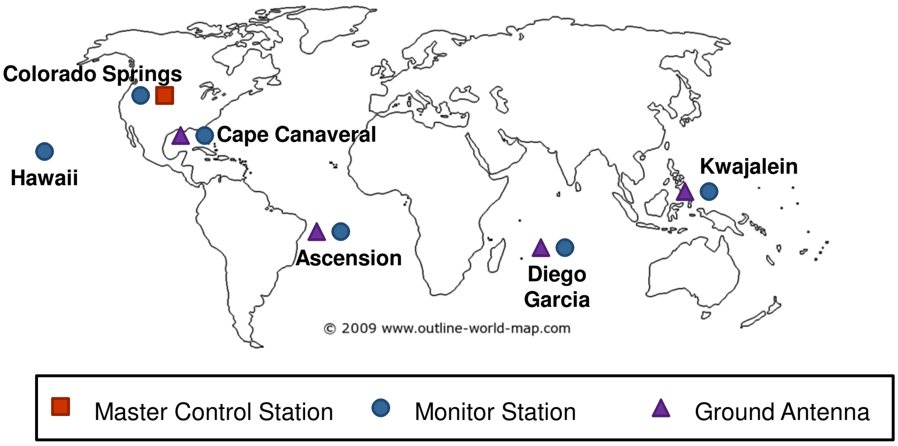
- GPS
  http://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationstatus
- GLONASS
  http://www.glonass-center.ru/en/GLONASS/
- Galileo
  http://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information
- GNSS
  http://gpsworld.com/the-almanac/

Luiz Paulo S. Fortes (2015)

GPS Ground/Control Segment – Overview

- The GPS ground segment is also called the operational control segment (OCS) and is responsible for
  - Monitoring satellite orbits
  - Monitoring and maintaining satellite health
  - Maintaining GPS time
  - Predicting satellite positions (ephemeris) and clock parameters
  - Updating navigation message (information sent to users)
  - Commanding satellite maneuvers to maintain orbit, relocate satellites to compensate for failures, etc.
- Currently, the navigation message data is updated at least once daily

GPS Ground/Control Segment – Stations



- Other stations are being added to improve satellite visibility from the ground
  - Better orbit and time determination

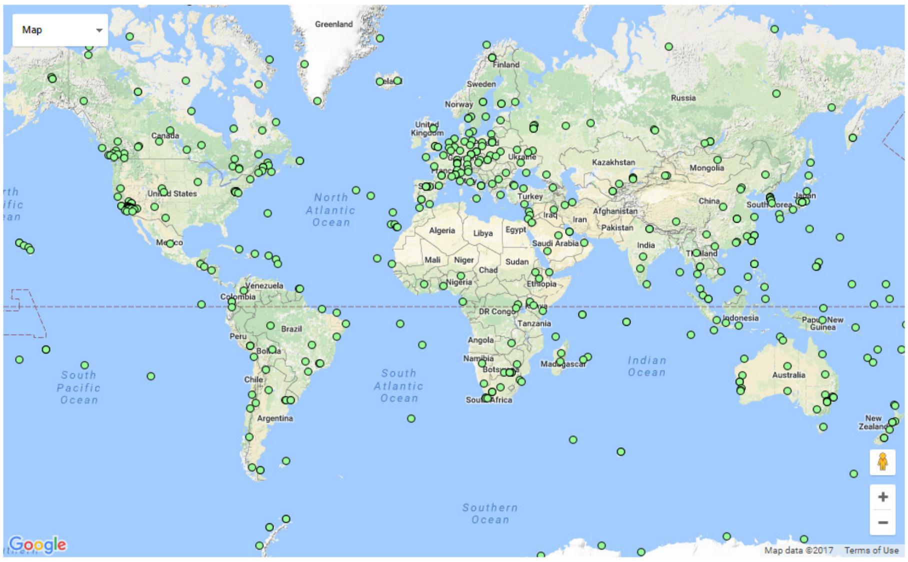
GPS Ground Segment – Reference Frame & Time

- GPS uses the World Geodetic System 1984 (WGS 84) as its reference frame. Differences between WGS 84 and other global reference systems such as ITRF are at the centimetre level.
- Timing is at the very heart of GPS since ranges are based on time of propagation of electro-magnetic waves. GPS has therefore defined its own time scale which is kept using a week count (GPS Week) and time into the week (TOW) in seconds.
  - GPS provides an atomic time scale determined by the satellite clocks plus five ground based atomic clocks.
    - GPS time was coincident with UTC at the GPS standard epoch of January 6, 1980 (0 hour)
    - No integer leap seconds are introduced into GPS time scale, but leap seconds are introduced in UTC

Post-Mission Orbits from IGS (1/2)

- IGS = International GNSS Service
  - Consists of 506 stations worldwide (as of March 1, 2017)
- Post-mission orbits (available after a few days) may be required for higher accuracy single point or differential applications
- Data from global tracking networks are combined to give more accurate post-mission orbits since little (or no) prediction is involved

Post-Mission Orbits from IGS (2/2)



IGS network (see http://igs.org/network)

IGS GPS Products and Accuracy

GPS Satellite Ephemerides / Satellite & Station Clocks

Type		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits	~100 cm	real time	--	daily
	Sat. clocks	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~3 cm	3 - 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rapid	orbits	~2.5 cm	17 - 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	orbits	~2.5 cm	12 - 18 days	every Thursday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat.: 30s Stn.: 5 min

http://igs.org/products

GPS User Segment

- Military Users
  - For use by land, sea and airborne vehicles
  - Infantry location and navigation
  - Not a perfect military system since it is prone to jamming (relies on line-of-sight from antenna to satellite)
- Civil Users
  - Navigation was primary focus of GPS developers, but surveying community quickly adopted the system for high accuracy positioning
  - The use of GPS in the civilian community is expanding rapidly due to the decrease in receiver costs (i.e., 10's of thousands of dollars to a few dollars)
  - Civil community much larger than military community which has implications in receiver technology rather than vice versa

Selective Availability and Anti-Spoofing

- Anti-Spoofing (AS)
  - Prevents receivers from being spoofed by fake signals
  - Effected through encryption of P code
    - Encrypted P code becomes Y code
    - P code on L1 and L2 no longer possible with standard code correlation techniques
- Selective Availability (SA)
  - Limited available accuracy of GPS to non-authorized users
  - Effected through satellite clock dithering and broadcast orbit accuracy degradation
  - Various SA levels could be implemented
  - Since May 2000, SA has been turned down to zero

GPS Standard Positioning Service (SPS)

- Accuracy of the SPS has increased with removal of SA
- Global position accuracy, 95% (nominal conditions)
  - Horizontal ≤ 9 m
  - Vertical ≤ 15 m

  Assumes ≥ 98 % global PDOP of 6 or less
- Time transfer accuracy, 95% (nominal conditions)
  - ≤ 40 ns

Reference: **GPS Standard Positioning Service (SPS) Performance Standard**, 4th Edition, U.S. Department of Defense, September 2008. Available for download at: http://www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo/default.htm

GNSS Receiver Categories

- In general, there are two categories of GNSS receivers
- Geodetic-grade receivers
  - Typically used for surveying or high-performance applications
  - Cost is one to several thousand dollars depending on capabilities
  - May include original equipment manufacturer (OEM) models (i.e., may not be a prepackaged product)
- Consumer-grade receivers
  - Much lower cost (<$1 to a few hundred dollars)
  - Wider range of applications (mostly due to cost)
  - *Chipsets* are a subset of this category where you only get the chip, not a prepackaged product

GPS Modernization

- GPS is currently being modernized to meet the current and future demands of the civil community
  - Improved signals to support safety-of-life applications (e.g., aircraft landing)
    - L2C (1227.60 MHz)
    - L5 (1176.25 MHz)
  - Will consist of additional 'coded' signals to improve availability, integrity (timely notice of an unhealthy signal, continuity of service, and resistance to interference)
  - Improved signal to enable interoperability between GPS and other GNSS
    - L1C (1575.42 MHz)
- Military needs will also be met to include
  - Protection of military service in the theatre of operation
  - Prevention of adversarial exploitation of GPS services
  - Preservation of civil service outside a theatre of operations
- New signals began to be phased in starting in 2005

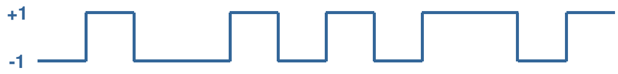
Some Online GNSS Resources

- http://www.navipedia.net A wiki containing information about all GNSS (in its infancy in 2013)
- http://www.navcen.uscg.gov/ US Coast Guard Information Center
- http://www.gpsworld.com/ GPS World Magazine
- http://www.insidegnss.com/ Inside GNSS Magazine
- http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml Solar cycle predictions by NASA
- http://tycho.usno.navy.mil/gps.html U.S. Naval Observatory (USNO) site providing various information on GPS timing operations.
- http://tycho.usno.navy.mil/what.html provides many time services, including a live broadcast of Universal Time and USNO Master Clock.
- http://gauss.gge.unb.ca/CANSPACE.html Canadian Space Geodesy Forum gives regular GPS and GLONASS constellation status reports
- http://igscb.jpl.nasa.gov/ International GNSS Service (IGS) site which provides GPS orbits, tracking data, etc. in near real time

 166

Basic GNSS Signal Structure

- In general, any GNSS signal can be thought of as being comprised of
  - A sinusoidal wave (“carrier wave”, or just “carrier”)
  - A ranging code that is used to measure the distance to the satellites. This also provides robustness to interference. The ranging code is a square wave consisting of a sequence of ±1’s.



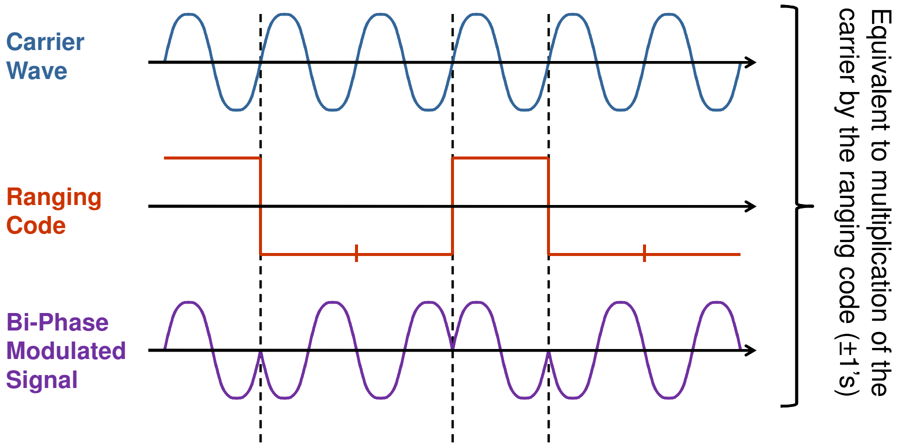
  - A navigation message (optional) than contains information on ephemeris, almanac, clock parameters, etc. It consists of a sequence of bits represented as ±1’s (i.e., it is also a square wave).
- The ranging code and navigation message are modulated onto the carrier wave using phase modulation (PM). Other modulation approaches include amplitude modulation (AM), frequency modulation (FM) and time modulation (TM), but these are not used by GNSS signals.

Multiple Access Capability

- Multiple access capability means that a receiver is able to “access” signals from multiple satellites at the same time. There are several ways of realizing this in GNSS:
  - Code Division Multiple Access (CDMA) is when all satellites have the same carrier frequency but different ranging codes. This is used by GPS, Galileo, Compass and future GLONASS satellites.
  - Frequency Division Multiple Access (FDMA) is when all satellites have the same ranging codes but different carrier frequencies. This approach is currently used by GLONASS (although GLONASS will shift to CDMA too).
- Other multiple access techniques include time division multiple access (TDMA) and space division multiple access (SDMA), although these are not used in GNSS

Bi-Phase Modulation

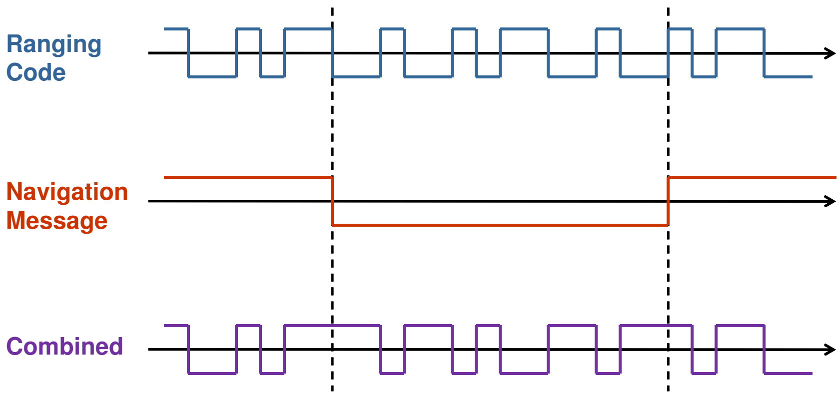
- We only consider bi-phase modulation which introduces a 180° phase shift in the carrier when the modulation changes



Not to scale

Including Navigation Message

- The navigation message is further modulated onto the carrier. Combination of ranging code and navigation message is done using multiplication of sequences of ±1's, which is equivalent to modulo-2 addition of sequences of zeros and ones.



Not to scale

GPS Signal Structure Overview

- The satellite has an internal "fundamental frequency", f_0, of 10.23 MHz. All *carrier waves* are integer multiples of f_0
  - $f_{L1} = 154 \times f_0 = 1575.42$ MHz
  - $f_{L2} = 120 \times f_0 = 1227.60$ MHz
  - $f_{L5} = 115 \times f_0 = 1176.45$ MHz

- The following *ranging codes* are used in GPS (all of which are periodic)
  - Coarse acquisition code: C/A-code
    - Available on L1
  - Precise code: P-code
    - Available on L1 and L2
    - Encrypted by U.S. military (using a classified Y-code) to yield the P(Y)-code
  - Modernization
    - L2C – Available on 19 satellites (7 IIR-M and 12 IIF) (Mar 2017)
    - L5 – Available on 12 IIF satellites (Mar 2017)
    - L1C – Will be available on Block III satellites

Complete GPS Satellite History is available here: ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt

GPS C/A and P Codes

Property	C/A-Code	P-Code
Chipping Rate	1.023 MHz	10.23 MHz
Chip Length (analogous to carrier wavelength)	293.1 m	29.31 m
Code Length	1,023 chips	2.3547×10^{14} chips
Code Period	1 ms	266.4 days (split into 7-day segments; one per satellite)
Minimum Received Power	-158.5 dBW	-161.5 dBW (IIR-M satellites or newer)

- The chip length (and thus chipping rate) is important in terms of a receiver's sensitivity to multipath
- The higher chipping rate for the P-code also makes it less sensitive to jamming and interference
- The short period of the C/A makes it easy/fast to acquire
- 'dBW' denotes power relative to one Watt (1 W)

GPS Signals Leaving the Satellite

- For this course, we only concern ourselves with the “legacy” L1 and L2 signals

$$L1(t) = AP(t)N(t)\cos(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2}AC(t)N(t)\sin(2\pi f_{L1}t)$$

$$L2(t) = AP(t)N(t)\cos(2\pi f_{L2}t)$$

where

- A is the amplitude
- P is the P-code ranging code
- C is the C/A-code ranging code
- N is the navigation message (data bits)
- f_{L1} is the L1 carrier frequency
- f_{L2} is the L2 carrier frequency

P(Y)-Code Signal Tracking

- Encryption of the P-code with the Y-code means that civil user cannot directly track the signal. However, some civilian receivers are able to track the L2 signal using advanced technology
  - All methods introduce a loss in signal-to-noise (SNR) ratio relative to direct P-code tracking; the *best case* loss is 14 dB (~25-fold!)
  - These technologies are very complicated and receiver manufacturers charge a premium for them (dual-frequency receivers are therefore much more expensive than L1-only receivers)
- Practical impact is poorer quality measurements on L2
  - More likely to experience cycle slips on L2 (more on cycle slips later)
  - Receiver is more likely to lose lock on L2 signals
  - L2 measurements are noisier than L1 measurements (mostly for pseudoranges)
- The above does **not** apply to the new L2C signal, since this signal is freely available to civilian users

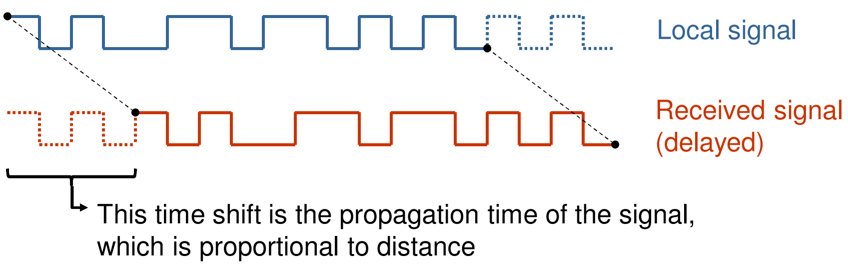
GNSS Measurements

- There are three main types of observations available from a GNSS receiver
  - Pseudorange
  - Doppler shift
  - Carrier phase (also called accumulated Doppler)

- The pseudorange and carrier phase are proportional to the distance between the user and the satellite and the Doppler shift is proportional to the range rate between the user and the satellite.

Psuedorange measurements

- Let´s assume that the receiver is perfectly synchronized to GNSS time. In this case, a GNSS receiver generates the ranging code internally and determines the time shift required to align the local code with the code received from the satellite. The time shift that maximizes the correlation between the local and incoming signal is the time it took the signal to propagate from the satellite to the receiver (which can then be scaled to a distance).



Pseudorange ("Code") Measurement

- The pseudorange measurement equation can be written as

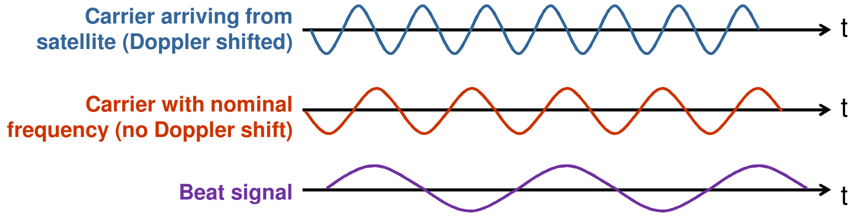
$$P = \rho + d\rho + c(dT - dt) + d_{iono} + d_{trop} + m_P + n_P$$

$$\begin{aligned}
P &= \text{Pseudorange} \\
\rho &= \text{Geometric range} \\
&= \left|\vec{r}_{SV} - \vec{r}_{Rx}\right| = \sqrt{(x_{SV} - x_{Rx})^2 + (y_{SV} - y_{Rx})^2 + (z_{SV} - z_{Rx})^2} \\
d\rho &= \text{Orbit error} \\
dT &= \text{Satellite clock error} \\
dt &= \text{Receiver clock error} \\
d_{iono} &= \text{Ionosphere error (dispersive)} \\
d_{trop} &= \text{Troposphere error} \\
m_P &= \text{Pseudorange multipath error} \\
n_P &= \text{Pseudorange noise}
\end{aligned}$$

We will look at the different error sources in more detail later

Carrier Phase Measurements

- GNSS receivers can measure the phase of the incoming signal with an accuracy of a few degrees, which implies the receiver is also tracking the frequency of the signal. With the actual (received) frequency known, the Doppler frequency can be computed by subtracting the nominal signal frequency (e.g., at L1).
- Once the Doppler is available, the carrier phase measurement is actually by integrating the Doppler (and is sometimes called the accumulated Doppler range).
- This can be interpreted as measuring the phase of a signal whose frequency is the difference between incoming and nominal signals (called a beat frequency in physics)



Carrier Phase Measurement

- The carrier phase measurement equation can be written as

$$\Phi = \phi\lambda = \rho + \lambda N + d\rho + c(dT - dt) - d_{iono} + d_{trop} + m_{\Phi} + n_{\Phi}$$

Φ = Carrier phase in units of length (e.g., m)
ϕ = Carrier phase in units of cycles
λ = Carrier wavelength
ρ = Geometric range
N = Carrier phase ambiguity (integer)
$d\rho$ = Orbit error
dT = Satellite clock error
dt = Receiver clock error
d_{iono} = Ionosphere error (dispersive)
d_{trop} = Troposphere error
m_{Φ} = Carrier phase multipath error
n_{Φ} = Carrier phase noise

We will look at the different error sources in more detail later

Pseudorange and Carrier Phase Differences

The main differences between the pseudorange and carrier phase measurements are

1. Carrier phase is ambiguous by the integer number of cycles (“ambiguity”) between the receiver and satellite *when the signal was (re-)acquired*. The pseudorange is “absolute”.
2. The pseudorange measurement is less precise
   - Multipath
     - Pseudorange: Typically m-level to 10’s of m for C/A code, depending on the receiver and environment
     - Carrier phase: Maximum of $\lambda/4$ (~4.5 cm for L1)
   - Noise
     - Pseudorange: cm- to m-level for C/A code, depending on the receiver
     - Carrier phase: Typically <1% of a cycle (mm level)
3. Sign of the ionosphere error

Doppler Measurement

- The Doppler measurement equation can be written as the time derivative of the carrier phase measurement (recall that the carrier phase is the integrated Doppler)

$$\dot{\Phi} = \dot{\phi}\lambda = \dot{\rho} + d\dot{\rho} + c(d\dot{T} - d\dot{t}) - \dot{d}_{iono} + \dot{d}_{trop} + m_{\dot{\Phi}} + n_{\dot{\Phi}}$$

- The geometric range rate is given by

$$\dot{\rho} = \frac{(\vec{v}_{SV} - \vec{v}_{Rx}) \bullet (\vec{r}_{SV} - \vec{r}_{Rx})}{|\vec{r}_{SV} - \vec{r}_{Rx}|}$$

- What can you estimate with Doppler measurements?

Carrier Phase Ambiguity (1/3)

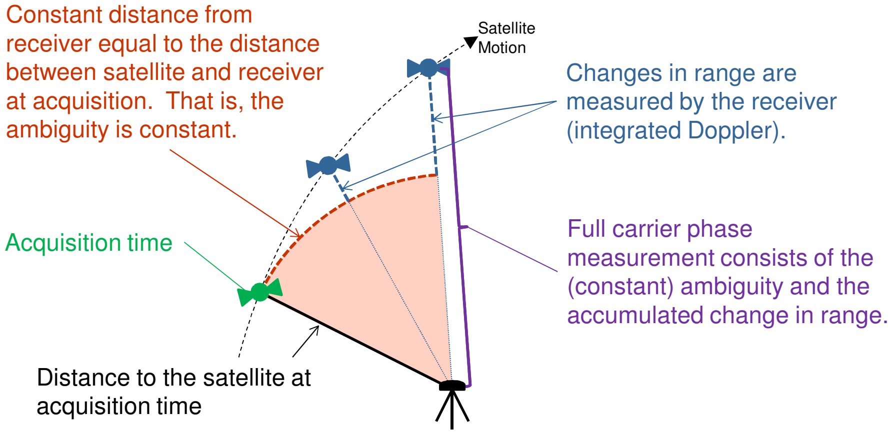
- Recall that the carrier phase is generated by integrating the Doppler within the receiver. Considering the geometric range term only, for convenience:

$$\begin{aligned}\Phi(t) &= \int_{t_0}^{t} \dot{\Phi}(t) \cdot dt \\ &\approx \int_{t_0}^{t} \dot{\rho}(t) \cdot dt \\ &= \Delta\rho(t_0, t) + \rho(t_0)\end{aligned}$$

- The integration constant, $\rho(t_0)$, is the distance between the satellite and the receiver *when the signal is first acquired* (i.e., at "lock on"). The integer number of cycles contained in this distance is the carrier phase ambiguity.

Carrier Phase Ambiguity (2/3)

- After acquisition, the integer number of cycles between the receiver and satellite is unknown. However, ***if no loss of lock occurs***, this value is ***constant***. Over time, the receiver continually measures the change in range.



Carrier Phase Ambiguity (3/3)

- Carrier phase ambiguities are integer by definition and are defined at acquisition. They are constant unless loss of lock occurs, even if only for a fraction of a second.
- The ambiguities are arbitrary (e.g., a few cycles or millions of cycles; positive or negative) and are different for each satellite-receiver measurement. In other words, they do not behave like the receiver clock error which is the same for all satellites. As such, estimating the ambiguities is much more difficult; more on this later in the course.
- The ***approximate*** ambiguity can be derived using pseudorange and carrier phase. Why is this only approximate?

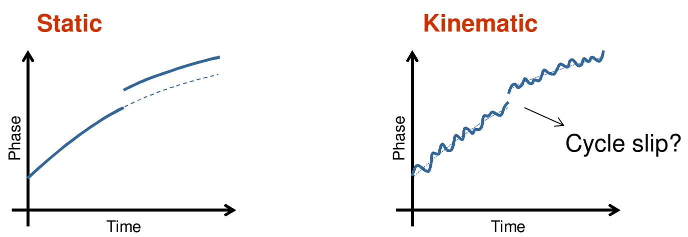
GPS time (s)	Pseudorange (m)	Carrier phase (cycles)	Ambiguity (ϕ - P/λ)
387234	22441825.779	-975001.392	-118907592
387235	22441597.023	-976188.862	-118907577
387236	22441371.704	-977375.523	-118907580

Definition of Cycle Slips

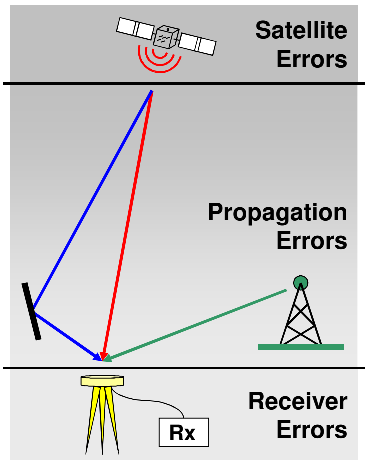
- If the receiver loses lock on the carrier (even if only briefly), the carrier phase ambiguity will change. A change in the carrier phase ambiguity over time is called a ***cycle slip***. Cycle slips occur for a variety of reasons
  - Weak signals
    - Signal attenuation or obstruction
    - Bad cable or cable connections
  - Multipath
  - High receiver dynamics (accelerations or jerks)
  - Scintillation effects due to ionosphere

Cycle Slips

- Detection of carrier phase cycle slips is critical for proper and effective use of carrier phase data. Furthermore, cycle slips are more difficult to detect in kinematic applications than in static applications because an additional Doppler shift is created by user motion which is difficult to predict. Options for cycle slip detection are dependent on operating mode (static vs. kinematic) and receiver type (single vs. dual frequency).



GPS Error Sources at a Glance



- Three basic sources of error
  - Satellite-based errors
    - Orbit errors
    - Satellite clocks
    - Group delay (not discussed)
  - Propagation errors
    - Ionosphere
    - Troposphere
    - Multipath
    - Interference
  - Receiver-based errors
    - Noise
    - Receiver clock (estimated)
    - Antenna errors
    - Inter-channel biases
    - Timing/Tracking errors

Typical GPS SPS Errors

Error	Uncompensated	Compensated
Broadcast satellite clock	• <1 ms (300 km)	• ~5 ns or ~1.5 m (1σ)
Broadcast orbit	• 1 m (1σ)	• N/A
Ionosphere	• 1-30 m at zenith (scale by ~3 near horizon)	• ~0 for dual frequency receiver • 50% reduction using basic model
Troposphere	• 2.4 m at zenith (scale by ~10 near horizon)	• ~0.2 m
Code multipath	• dm to m level depending on Rx • Max of 0.5 chip	• N/A
Carrier phase multipath	• ≤0.25λ, but typically 0.1λ (1σ)	• N/A
Code Noise	• dm to m level depending on Rx	• N/A
Carrier Phase Noise	• Typically ≤1 mm	• N/A

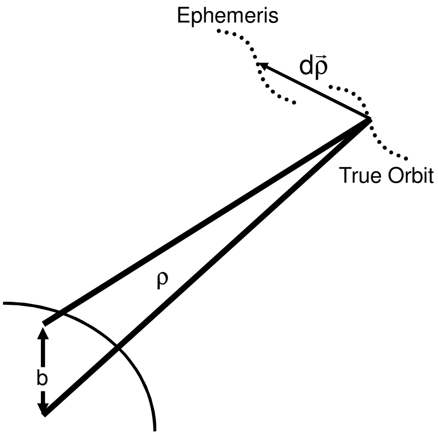
Broadcast Satellite Clock Model

- Due to the high quality of the oscillators in the satellites, the satellite clock errors change smoothly and slowly with time. They are easily modeled using a simple polynomial, whose coefficients (a_{f0}, a_{f1} & a_{f2}) are broadcast in the GPS navigation message. The correction is given by

$$dT = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2$$

- The magnitude of the correction is less than 1 ms, and just like the broadcast ephemeris (for satellite orbit), the satellite clock parameters are predicted ahead of time. The error in the prediction is very small; typically 5 ns, or ~1.5 m (http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html).
- The error is the ***same*** for all receivers tracking the same satellite at the same time. What does this mean in terms of differential error?

Differential Orbital Errors



- The differential error is purely geometrical and depends on the orbital error ***vector***, and the line of sight to the different receivers. The worst-case error is approximately given by

$$db_{max} = \frac{|d\vec{\rho}|}{\rho} b$$

where b is the baseline length, ρ is the range to the satellite and dρ is orbital error.

- Given that the broadcast orbital error is ~1 m and the range to the satellites is ~20,000 km, the differential error is 0.05 ppm

$$db_{max} = (0.05 \times 10^{-6})b$$

Ionosphere Overview

- The ionosphere is the part of the atmosphere (50 – 1,000 km above the Earth) that contains free electrons. The existence of the ionosphere is due to UV radiation from the Sun. The Sun therefore plays a key role in the level of ionospheric activity. To this end, there are two main variations in the ionospheric effect:
  - Daily (diurnal) variations due to Earth rotation
  - The amount of energy released by the Sun varies with an 11-year solar cycle.
- Largest effects occur in polar regions (auroral zone) and near the geomagnetic equator. Ionospheric scintillation is a major concern, especially in auroral zones and near the geomagnetic equator.

 191

Ionosphere Error Overview (1/2)

- Ionosphere is dispersive at GNSS frequencies meaning that the magnitude of the error depends on frequency of signal passing through the medium. The magnitude of the error is proportional to the density of free electrons in the atmosphere. The electron density is quantified by counting the number of electrons in a column with a cross-sectional area of 1 m^2, and is called ***Total Electron Content (TEC)***.
- An interesting phenomenon involving the ionosphere is that the pseudorange is *delayed* ("group delay") while the carrier phase is *advanced* ("phase advance") – an effect called ***code-carrier divergence***. Both effects have the same magnitude (i.e., opposite sign).

Ionosphere Error Overview (2/2)

- Some of the key ionosphere error properties are as follows
  - The delay/advance ranges from 1 m to 100 m depending on time of day, solar cycle and satellite elevation (relative to the user)
  - The diurnal maximum occurs around 2:00 pm local time, with a possible second maximum around 10:00 pm in the equatorial region
  - The solar cycle varies the magnitude of the error by a factor of ~3 over a period of 11 years
  - Total delay in the zenith can range from a from ~1 m to ~30 m and increases approximately three-fold at the horizon
  - Increased effects are often encountered at ±10° latitude from the *geomagnetic* equator (Equatorial Anomaly) and in the *auroral zone* near the poles
  - Seasonal variation: lowest TEC in the winter (June-August); maxima (i.e., 2 to 3 times higher) close to the equinoxes (March and September) and in the summer (December-February)

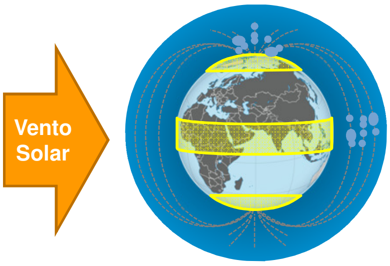
Ionospheric Scintillation

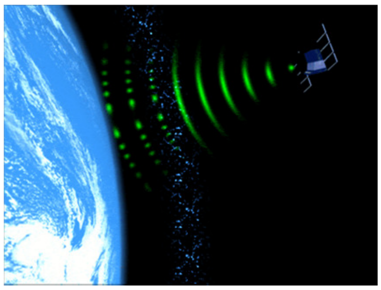
- Scintillation is the rapid variation in the phase and amplitude of the received signal. It is characterized by depth of fading and fading period. Scintillation is caused by electron density irregularities, which, in turn, is typically correlated with level of geomagnetic activity.

- The effects on GNSS measurements
  - Loss of phase lock due to lower SNR, especially receivers trying to track the L2 P(Y) code (recall that tracking this signal results in worse performance)
  - Loss of phase lock due to phase variations outside the tracking loop bandwidth; in some cases it may prevent the receiver from tracking the signal at all.
  - It can make data more difficult or even impossible to process

Cintilação Ionosférica

- Ocorre quando ondas de rádio encontram em sua propagação pequenas irregularidades na densidade de eletrons na atmosfera
- Causa flutuações temporais rápidas na amplitude e fase do sinal





Mitigating the Ionosphere

- The following options are available for mitigating the effect of the ionosphere
  - Use the Broadcast ionospheric model
  - Using dual frequency data to remove first order ionospheric effects
  - Use a grid model supplied by third party
  - Observe when the ionosphere is quiet. Geomagnetic activity is predicted up to ~1 month in advance and is correlated with ionospheric activity.
- Each of these are discussed in more detail on the following slides

Ionosphere-Free (IF) Linear Phase Combination

- Instead of computing and applying the error as on the previous slide, the ionosphere-free (IF) linear combination for carrier phase measurements is usually formed

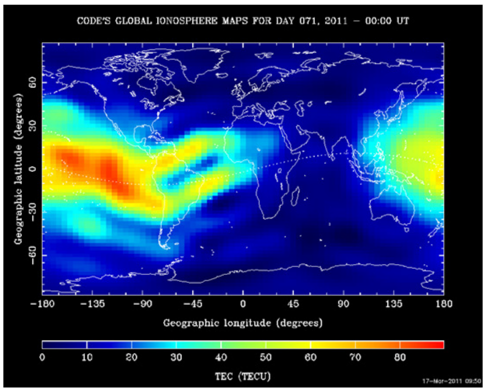
$$\phi_{IF} = \phi_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \cdot \phi_{L2}$$

- However, in this case, the carrier phase ambiguity is also not integer. The importance of this will become obvious when we discuss how to estimate the ambiguities.

$$N_{IF} = N_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \cdot N_{L2}$$

Global Ionospheric Maps

- Several civilian groups have developed global or regional ionospheric maps based on the IGS (or similar) data. This is generally done in conjunction with Wide Area Differential GPS (e.g., WAAS) processing.

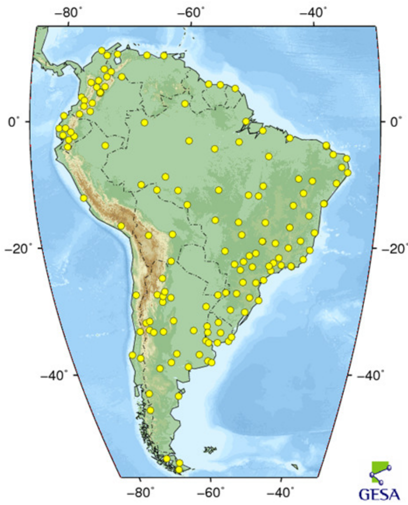


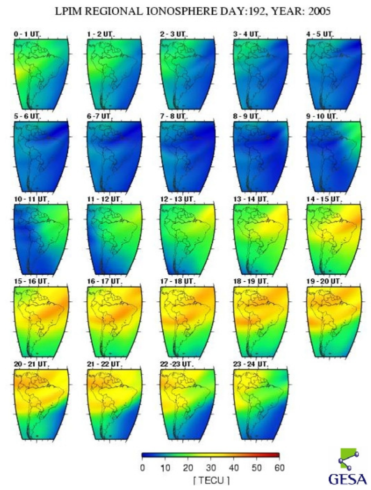
This can be used to interpolate errors for your location. More specifically, the errors are interpolated to where the line-of-sight signal intersects with the upper atmosphere (which is typically modeled as a thin shell).

http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim.gif

Mapas Regionais da Ionosfera (1/2)

- Mapas para a América do Sul pela Universidade de La Plata





(fonte: http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/)

Luiz Paulo S. Fortes (2015)

Mapas Regionais da Ionosfera (2/2)

- INPE/EMBRACE
  - Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial

  - Cálculo e previsão de TEC
  - Cálculo de S4
  - etc.

http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/

Luiz Paulo S. Fortes (2015)

Observed Differential Ionosphere Errors

- The magnitude of the differential error is a function of geographic location

Geographic Location	Error Magnitudes	
	Typical (RMS)	Extreme
Auroral Zone	1-3 ppm	10 ppm [1] 10 ppm [2]
Mid-Latitude	1-3 ppm	8 ppm [3] 10 ppm [1]
Low Latitudes	1-3 ppm	17 ppm [4] 30 ppm [5]

[1] Skone, S. (1998) Wide Area Ionosphere Grid Modelling in the Auroral Region, PhD Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, UCGE Report Number 20123 (available at: http://geomatics.ucalgary.ca/links/GradTheses.html).
[2] Lachapelle, G., P. Alves, L.P. Fortes and M.E. Cannon (2000) DGPS RTK Positioning Using a Reference Network, Proceedings of ION GPS 2000, Institute of Navigation, pp. 1165-1171.
[3] Klobuchar, J.A., P.H. Doherty, M.B. El-Arini (1995) Potential Ionospheric Limitations to GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS), Navigation: Journal of the Institute of Navigation, Vol 42, No 2, Alexandria, VA, pp. 353-370.
[4] Fortes, L.P., M.E. Cannon and G. Lachapelle (2000) Testing a Multi-Reference Station Network for OTF Positioning in Brazil, Proceedings of ION GPS 2000, Institute of Navigation, pp. 1133-1142.
[5] Wanninger, L. (1993) Effects of Equatorial Ionosphere on GPS, GPS World, July 1993, pp. 48-54.

Troposphere and GNSS (1/2)

- The term “troposphere” is a bit ambiguous. The atmospheric science community defines it as extending ~9 km over the poles to ~16 km at the equator and includes most of the water vapour. *For GNSS, however, the neutral (non-dispersive) part of the atmosphere, up to about 50-70 km, is called troposphere.* Unlike the ionosphere, the troposphere is non-dispersive. That is, it affects L1 and L2 the same.

- The magnitude of the error is about 2.4 m at the zenith and increases by approximately a factor of four for an elevation angle of 15º. Fortunately, relatively simple models can estimate the effect to within about 20 cm and thus the error is not a significant problem for low accuracy positioning. Rather, problems can arise for high accuracy positioning.

Troposphere and GNSS (2/2)

- The tropospheric delay is subdivided into dry (hydrostatic) and wet components, with the latter being harder to model accurately.
- In general, differential error is not a large problem for short baselines with similar heights. Conversely, if high accuracy is required or if receivers have different heights, the differential error may be important.
- Methods to compensate for the troposphere:
  - Apply a tropospheric model (e.g., Hopfield or Saastomoinen)
  - Model a residual zenith delay as part of the estimation process
  - Use a water vapour radiometer

Brunner, F.K. and W.M. Welsch (1993), 'Effect of the Troposphere on GPS Measurements, GPS WORLD, January.

Dry and Wet Refractivity

- The dry (hydrostatic) refractivity accounts for 80-90% of the total errors and is a function of surface pressure (P) and surface temperature (T). Fortunately, these parameters are able to be well predicted with altitude and thus a 'dry' model can remove ~99% of the error.
- In contrast, the wet refractivity accounts for 10-20% of the total errors and is a function of partial pressure of water vapour (e) and surface temperature (T). Since the water vapour content is difficult to predict with altitude, a 'wet' model can only remove 80-90% of the error.

Term	Error Magnitude (Typ.)	Correction Accuracy (Typ.)	Error After Correction (Typ.)
Dry	1.9 m (80%)	99%	0.02 m
Wet	0.5 m (20%)	85%	0.08 m
Total	2.4 m	96% (computed)	0.10 m

Troposphere Models

- Troposphere models usually try to model the dry and wet refractivity in the zenith and then map this error to a particular elevation angle (of the satellite). Note that the mapping function is usually different for the dry and wet errors.

$$\begin{aligned} N &= N_d + N_w \\ &= N_d^z \cdot m_d(\varepsilon) + N_w^z \cdot m_w(\varepsilon) \end{aligned}$$

- A couple notes
  - The mapping functions, $m(\varepsilon)$, assume the atmosphere is isotropic. That is, they assume the atmosphere is the same in all directions. Is this reasonable?
  - Ideally, the zenith refractivity values should account for the height of the user (above h=0). Otherwise, the algorithm may over-compensate the error.

Differential Tropospheric Error

- Once a troposphere model is applied, the differential errors are typically less than 1 ppm.
- Differential errors larger than about 3 ppm are very rare. These occur mainly in areas of high humidity and/or areas of unstable weather (e.g., storms).
  - Large height differences at both receivers (e.g., airplane and airport) combined with a troposphere model that does not consider user height would also introduce large errors.

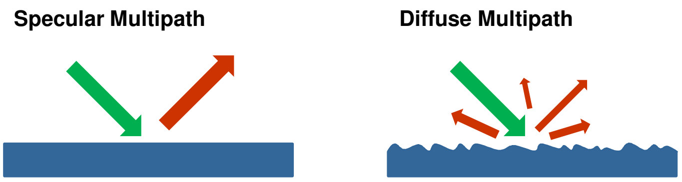
GNSS Receiver Clock Error

- We have already seen that a GNSS receiver's estimate of GNSS time is generally incorrect and thus introduces a bias into *all* of the measurements at a given instant.

- Although the clock error could theoretically grow without bound, GNSS receiver manufacturers usually limit it to within predefined levels (typically ±1 ms). This can be enforced by periodically resetting the receiver's clock estimate (called a millisecond jump) or by "steering" the receiver's oscillator such that the clock error remains approximately constant (i.e., no clock drift).

Multipath Error Overview

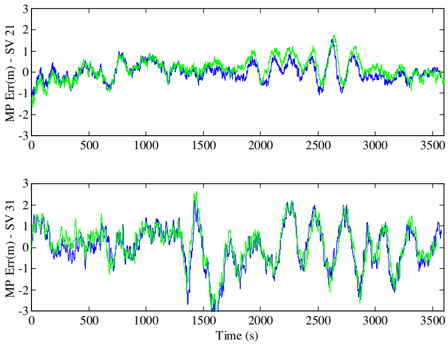
- Multipath is when the signal is received by a user via more than one path (usually the line of sight path and one or more reflected paths).
  - Specular multipath is when parallel incident rays remain parallel after reflection. This occurs when reflecting off of smooth surfaces such as glass and standing water.
  - Diffuse multipath occurs when a signal get reflected in different directions. This occurs with rough reflecting surfaces.



Multipath Correlation

- At a given (static) location, multipath is typically correlated over 10’s of seconds. Beyond this time, the error appears uncorrelated until one full sidereal day has passed (see graph to the right).
- Spatially, however, multipath decorrelates over a few cm. In other words, for all practical purposes, multipath errors at different receivers is independent.

Day-to-Day Multipath For PRNs 21 and 31
Day 1 in blue (dark)
Day 2 in green (light)



Multipath Error Summary

Characteristic	Pseudorange	Carrier Phase
Presence of Error	Completely dependent on reflecting geometry	
Magnitude	Maximum of 0.5 chips	Maximum of 0.25 λ
Zero mean?	No	Yes
Temporal variability	Approximately sinusoidal over a few 10’s of seconds	
Temporal correlation	Over a few 10’s of seconds	
Spatial correlation	Zero (beyond ~10 cm)	
Reduced by differential?	No (amplified in terms of a standard deviation)	

What do to about Multipath?

- Site selection
  - Select site with minimum obstructions.
  - Roofs are particularly poor
  - Watch surrounding medium (e.g. water)
- Antenna selection
  - Select antenna which minimizes multipath (e.g., use groundplane or chokering)
- Modeling
  - Requires modeling of conductivity of surrounding environment, which is very difficult and mathematically cumbersome.
- Use receivers with multipath mitigation technologies
  - Includes some of the advanced correlator techniques

TOWNSEND, B., and P. FENTON [1994] A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver. ION GPS-94, Salt Lake City, 21 – 23 Sept.

VAN NEE, R.D.J., and J. SIERECELD, FENTON, P., and B. TOWNSEND [1994] The Multipath Estimating Delay Lock Loop – Approaching Accuracy Limits. Proceedings of PLANS-94, pp. 246-251.

Posicionamento por Ponto, Diferencial e com a fase da Onda Portadora

Single Point Positioning

- A single point position is when you compute your solution using pseudorange data from only one receiver. Expanding the measurement model for the i-th satellite gives

$$
\begin{aligned}
P_i &= \rho_i + cdt + \varepsilon_P \\
&= \sqrt{\left(x_i^s - x^r\right)^2 + \left(y_i^s - y^r\right)^2 + \left(z_i^s - z^r\right)^2} + cdt + \varepsilon_i^P \\
&= f\left(\hat{\mathbf{x}}\right)
\end{aligned}
$$

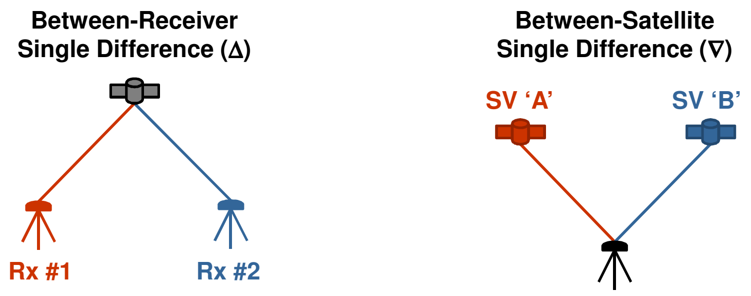
In this case, the unknowns are the position of the receiver (x^r,y^r,z^r) and the receiver clock bias in units of length (cdt):

$$\mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} x^r & y^r & z^r & cdt \end{bmatrix}$$

Finally, the error term ε_P is the total of all errors

Single Differencing Overview

- There are between-receiver and between-satellite single differences:



- On the following slides, we cover these concepts in light of the knowledge of the various GNSS errors. We also look at using carrier phase data, instead of just the pseudorange.

Between-Receiver Single Differencing (1/2)

- The between-receiver single difference measurement equations can be written as

$$\begin{aligned}\Delta P_{12} &= P_2 - P_1 \\ &= \Delta\rho + \Delta d\rho + c(\Delta dT - \Delta dt) + \Delta d_{iono} + \Delta d_{trop} + \Delta m_P + \Delta n_P \\ \Delta\Phi_{12} &= \Phi_2 - \Phi_1 \\ &= \Delta\rho + \Delta d\rho + c(\Delta dT - \Delta dt) - \Delta d_{iono} + \Delta d_{trop} + \Delta m_\Phi + \Delta n_\Phi + \lambda\Delta N\end{aligned}$$

- What can we say about the errors?

Error	Magnitude
$\Delta d\rho$	
$c\Delta dT$	
$c\Delta dt$	
Δd_{iono}	
Δd_{trop}	

Error	Magnitude
Δm_P	
Δn_P	
Δm_Φ	
Δn_Φ	

Between-Receiver Single Differencing (2/2)

- The geometric range term can be written as

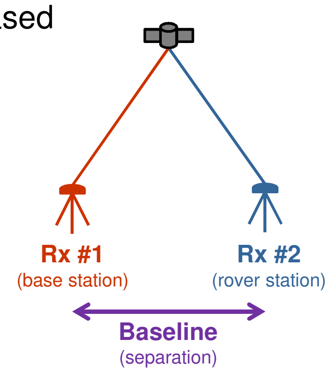
$$\begin{aligned}\Delta\rho &= \rho_2 - \rho_1 \\ &= \left|\vec{r}_{SV} - \vec{r}_{Rx2}\right| - \left|\vec{r}_{SV} - \vec{r}_{Rx1}\right|\end{aligned}$$

- Normally, it is assumed that receiver #1 is setup at a known location and this receiver is thus often called a “base station”.

- In this case, the position of the second receiver — the “rover” receiver — is computed relative to the base station.
  - In other words, we are now performing ***relative positioning***, not absolute positioning. This is also the origin of the term ***differential positioning***, as in ***Differential GPS/GNSS (DGPS/DGNSS)***

Summary of Between-Receiver Differencing

- The key benefits of between-receiver differencing are
  - Reduces errors correlated between the base and remote stations. The extent of the reduction is a function of the spatial decorrelation of the error source and the distance ("baseline") between the receivers.
  - Eliminates the satellite clock error (i.e., these are perfectly correlated).
- Main drawback is that the standard deviation of multipath and noise increased by √2 relative to the undifferenced (i.e., "raw") measurements.
- The estimated parameters include
  - Rover station position (x,y,z or ϕ,λ,h)
  - Relative clock error ($c\Delta dt$)
  - Ambiguities (carrier phase case only)
- Cannot separate clock from ambiguity terms.



Alternate Between-Receiver Difference (1/2)

- The previous slides require that measurements from the base and rover stations are available at the same time in order to difference them.
  - This imposes constraints on real-time implementation in terms of what (and how much) information needs to be communicated as well as how often it needs to be communicated. In turn, these requirements dictate what type of communication infrastructure you need to communicate between the base and rover stations.
- It is therefore common to adopt a different approach. Specifically, at the base station, you can compute the geometric range term directly since both the receiver and satellite positions are known. As such, we can generate a correction term as follows (subscript 'b' is for the base station)

$$P_b - \rho_b = d\rho_b + c(dT - dt_b) + d_{iono,b} + d_{trop,b} + m_{P,b} + n_{P,b}$$
$$= \text{Correction}$$

Alternate Between-Receiver Difference (2/2)

- Note that the correction term only contains error terms. Since most of the errors change slowly, the corrections can be generated (and communicated) at a relatively low rate. This eases the requirements of the communication system.
- Once the corrections are received at the rover station, they can be applied to the rover data (subscript 'r' is for rover station)

$$\begin{aligned}
P_r &= \rho_r + d\rho_r + c(dT - dt_r) + d_{iono,r} + d_{trop,r} + m_{P,r} + n_{P,r} - \text{Correction} \\
&= \rho_r + d\rho_r + c(dT - dt_r) + d_{iono,r} + d_{trop,r} + m_{P,r} + n_{P,r} \\
&\quad - d\rho_b + c(dT - dt_b) + d_{iono,b} + d_{trop,b} + m_{P,b} + n_{P,b} \\
&= \rho_r + \Delta d\rho + c(\Delta dT - \Delta dt) + \Delta d_{iono} + \Delta d_{trop} + \Delta m_P + \Delta n_P
\end{aligned}$$

- In this case, the errors are the same as if the measurements were differenced directly.

Between-Satellite Single Differencing (1/2)

- The between-satellite single difference measurement equations can be written as

$$\begin{aligned}
\nabla P^{AB} &= P^B - P^A \\
&= \nabla\rho + \nabla d\rho + c(\nabla dT - \nabla dt) + \nabla d_{iono} + \nabla d_{trop} + \nabla m_P + \nabla n_P \\
\nabla\Phi^{AB} &= \Phi^B - \Phi^A \\
&= \nabla\rho + \nabla d\rho + c(\nabla dT - \nabla dt) - \nabla d_{iono} + \nabla d_{trop} + \nabla m_\Phi + \nabla n_\Phi + \lambda\nabla N
\end{aligned}$$

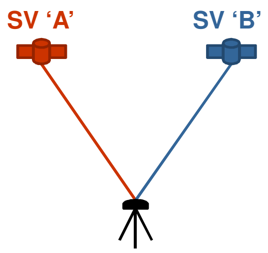
- What can we say about the errors?

Error	Magnitude
$\nabla d\rho$	
$c\nabla dT$	
$c\nabla dt$	
∇d_{iono}	
∇d_{trop}	

Error	Magnitude
∇m_P	
∇n_P	
∇m_Φ	
∇n_Φ	

Summary of Between-Satellite Differencing

- The primary benefit of between-satellite differencing is that is removes the receiver clock offset, although this does not help to improve solution accuracy.
- As with between-receiver differencing, the uncorrelated errors (noise and multipath) are increased by $\sqrt{2}$.
- Between-satellite differences are correlated with each other.
- The primary use of between-satellite single differences is to help form double differences (discussed shortly).



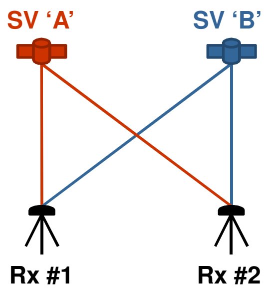
Double Differencing

- Double differencing combines between-receiver and between-satellite differences. The measurement equations are (simplifications made based on discussions in previous slides)

$$\begin{aligned}\nabla\Delta P_{12}^{AB} &= \Delta P_{12}^{B} - \Delta P_{12}^{A} = \nabla P_{2}^{AB} - \nabla P_{1}^{AB} \\ &= \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta d_{iono} + \nabla\Delta d_{trop} + \nabla\Delta m_{P} + \nabla\Delta n_{P}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nabla\Delta \Phi_{12}^{AB} &= \Delta \Phi_{12}^{B} - \Delta \Phi_{12}^{A} = \nabla \Phi_{2}^{AB} - \nabla \Phi_{1}^{AB} \\ &= \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta d_{iono} + \nabla\Delta d_{trop} + \nabla\Delta m_{\Phi} + \nabla\Delta n_{\Phi} + \lambda\nabla\Delta N_{12}\end{aligned}$$

- Combines the aspects of both single differences:
  - Reduces spatially correlated errors
  - Removes receiver and satellite clocks
  - Increases the standard deviation of multipath and noise by 2

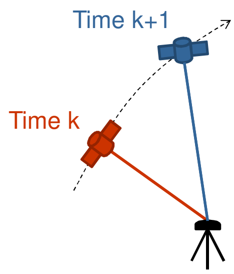


Time Differences

- In some instances, differences over time can be used. They are typically used with the carrier phase, and the corresponding measurement equation is as follows

$$\delta\Phi(t_1,t_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1)$$
$$= \delta\rho + \delta d\rho + c(\delta dT - \delta dt) - \delta d_{iono} + \delta d_{trop} + \delta m_{\Phi} + \delta n_{\Phi} + \cancel{\lambda\delta N}$$

- If there are no cycle slips, the ambiguity term disappears. This is the main advantage of this approach.
- The noise and multipath are increased by $\sqrt{2}$ relative to the un-differenced case. All other error terms reduce to the *change* in error over time (usually small).
- This difference can also be used to compute *changes* in position over time.



Triple Differences

- A triple difference is formed by differencing two double differenced measurements across epochs. As should be expected:
  - All clock errors and the ambiguities are eliminated (assuming no cycle slips).
  - Spatially correlated errors are reduced.
  - The standard deviation of multipath and noise and increased by $2\sqrt{2}$.
- In some highly specialized static processing software packages, this approach is used as an initial processing step. The downside is that you require a fairly large amount of data (few hours) to get a reasonably accurate position solution.

Ambiguity Resolution: Concept

Why Ambiguity Resolution? (1/3)

- The carrier phase ambiguities are known to be integers. However, estimating them in a least-squares adjustment yields real-valued estimates – often called ***float ambiguities***.

Observations → Least-Squares ⇒

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} & \nabla\Delta\hat{N}_{12} & \cdots & \nabla\Delta\hat{N}_{1M} \end{bmatrix}^T$$

These are real-valued estimates (least-squares does not know any better)

- Estimating float ambiguities reduces the degrees of freedom in your adjustment resulting in poorer performance.
  - Although the real-valued ambiguity estimates will (theoretically) converge to the true integer values, this can take a long time (hours) and the process has to reset if there is a cycle slip or loss of lock.

Why Ambiguity Resolution? (2/3)

- ***Ambiguity resolution*** exploits the integer nature of the ambiguities. Specifically, once resolved as integers – that is, once the (hopefully correct) integer values are determined – the ambiguities no longer need to be estimated and they can be removed from the vector of unknowns, resulting in more degrees of freedom and higher accuracy.
- If the ambiguities are known, we can write:

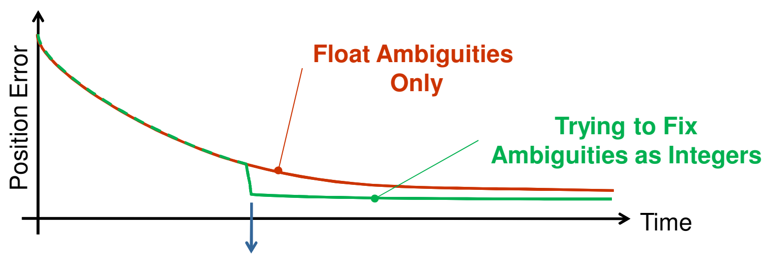
$$\nabla\Delta\Phi - \lambda\nabla\Delta N = \underbrace{\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta d_{iono} + \nabla\Delta d_{trop} + \nabla\Delta m_{\Phi} + \nabla\Delta n_{\Phi}}$$

This is the same as the right hand side of the double difference pseudorange equation, but with smaller noise and multipath errors! (and opposite sign on the ionosphere)

- In this way, the best possible positioning accuracy is obtained more quickly than when using float ambiguities.

Why Ambiguity Resolution? (3/3)

- Once the ambiguities are resolved, we say they are “fixed” (to integer values) and the position accuracy improves ***if the ambiguities are resolved correctly***.
  - A wrong ambiguity fix is the same as a ranging error whose magnitude is an integer multiple of carrier phase wavelengths, and will consequently produce positioning errors.
  - Wrong fixes are difficult to detect and pose a serious integrity threat because the estimated accuracy will be less than the actual error.



Ambiguities fixed to integers here (increase degrees of freedom)

Getting a Feel for Ambiguity Resolution (1/2)

- Ambiguity resolution is a very challenging process for two main reasons: (i) it is computationally difficult, and (ii) there is a possibility of incorrectly fixing an ambiguity. The latter comes with an associated integrity risk. Incorrect ambiguity fixing is a major concern because of the short wavelengths involved.

Rule of Thumb:
To resolve carrier phase ambiguities, you need your range errors (biases + noise) to be less than half of the carrier wavelength

- For L1 ($\lambda \approx 19$ cm), the above rule of thumb requires you to have range errors less than 9.5 cm!
- Note that the above "threshold" can be satisfied over time by trying to average out the various error sources.

Getting a Feel for Ambiguity Resolution (2/2)

- Given the rule of thumb on the previous page, we re-examine the double difference carrier phase equation

$$\nabla\Delta\Phi = \underbrace{\nabla\Delta\rho + \lambda\nabla\Delta N}_{\text{Desired parameters}} + \underbrace{\nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta d_{iono} + \nabla\Delta d_{trop} + \nabla\Delta m_{\Phi} + \nabla\Delta n_{\Phi}}_{\text{Errors}}$$

- The importance of understanding the differential errors is now more important than ever. Without this knowledge, the following questions could not be answered:
  - What is the longest baseline over which I can resolve my ambiguities?
  - How large can the ionosphere error be before ambiguity resolution is unfeasible?
  - How long do I have to occupy a point in order to resolve my ambiguities?

Key Factors Affecting Ambiguity Resolution

- Static versus kinematic
  - Ambiguities are generally easier to resolve in static mode because the errors can be more effectively averaged
- Baseline separation
  - The shorter the baseline, the easier it is to resolve ambiguities
- Multipath
  - Since multipath is site-specific it has a major impact on ambiguity resolution
- Length of data set and geometry
  - Information is gained through the satellite geometry change – longer observation times give better opportunity for resolution
  - The more satellites tracked the better
- Type of GNSS receiver
  - Dual-frequency receivers can usually resolve ambiguities faster than single frequency systems due to ability to form linear carrier phase combinations

Steps to Ambiguity Resolution

- Although a variety of ambiguity resolution algorithms have been developed, they all share the same basic steps, as listed below and summarized on the following slides:
  1. Estimate the position and the float ambiguities using least-squares (static) or a Kalman filter (kinematic)
  2. Define a search space within which the integer ambiguities are *assumed* to reside
  3. For each ambiguity combination, compute the least-squares residuals
  4. Use the residuals to identify the best ambiguity set and determine if they are reliable; if so, use this set as the ***fixed*** integer ambiguities and compute a fixed ambiguity position solution

- It is also noted that if a cycle slip is detected, the ambiguity resolution process for the affected ambiguity(ies) must be restarted (i.e., you need to estimate a new ambiguity).

Linear Phase Combinations

- L1 and L2 carrier phase measurements can be linearly combined as

$$\phi_{a,b} = a\phi_{L1} + b\phi_{L2}$$

with a wavelength of

$$\lambda_{a,b} = \frac{c}{af_{L1} + bf_{L2}} = \frac{\lambda_{L1}\lambda_{L2}}{b\lambda_{L1} + a\lambda_{L2}}$$

- We can look at this concept in the context of ambiguity resolution with consideration for
  - Errors in units of cycles (important for ambiguity resolution)
  - Errors in units of metres (important for positioning accuracy)

Reference: Petovello, M.G. (2009) **What are Linear Carrier Phase Combinations and What are the Relevant Considerations?**, Inside GNSS, Vol 4, No 1, pp. 16-19. Available at: http://insidegnss.com/node/1122

Some Common Combinations

Name	a	b	λ (m)	Ambiguity
L1 only	1	0	0.1903	N_{L1}
L2 only	0	1	0.2442	N_{L2}
Widelane	1	-1	0.8619	$N_{WL} = N_{L1} - N_{L2}$
Ionosphere-free	1	$-f_{L2} / f_{L1}$	0.4844	$N_{IF} = N_{L1} - f_{L2} / f_{L1} N_{L2}$
Narrowlane	1	1	0.1070	$N_{NL} = N_{L1} + N_{L2}$

Note that the ambiguities for the ionosphere free (IF) combination are no longer integer in nature and thus cannot be used in ambiguity resolution algorithms

RTK vs. DGNSS Processing

- The term "real-time kinematic" (**RTK**) was initially coined in the context of fixed ambiguity carrier phase positioning. However, it is more generally used to refer to any form of carrier phase processing, including when using float ambiguities. This contrasts with term "differential GNSS" (**DGNSS**) which is used to refer to positioning based on pseudorange measurement only (possibly with carrier smoothing).

- RTK messages 18-21 are used for RTK (carrier phase) positioning.

Precise Point Positioning (PPP)

- PPP aims at obtaining centimetre positioning accuracy ***without the need for a base station***. Such an approach has significant operational benefits.
  - Requires dual-frequency data to remove ionosphere errors
  - Requires precise clock and orbit information (in real-time)
  - Requires estimation of the tropospheric error
- Major challenges include
  - Relatively long time (10's of minutes, but decreasing) required to converge to the highest accuracy solutions
  - Estimation of satellite and receiver hardware effects that cancel when forming double differences
  - Obtaining the precise orbit/clock in real-time
- NRCan has a PPP service available for use (free)
  - http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php
- IBGE disponibiliza (gratuitamente) serviço PPP baseado no sistema canadense e adaptado para o Brasil → resultados em SIRGAS2000
  - http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm

Reference: Gao, Y. (2006), **What is Precise Point Positioning (PPP), and what are its requirements, advantages and challenges?**, Inside GNSS, Nov/Dec 2006, pp. 16-18.

Planejamento de campanhas GNSS

http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/Settings

Redes geodésicas ativas

- **RBMC: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**

  http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm

- **RAMSAC: Red Argentina de Monitoreo Continuo Satelital**

  http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac

Posicionamento pós-processado e em tempo real (relativo e PPP)

- **IBGE-PPP: Posicionamento por Ponto Preciso**

  http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm

- **RTKLIB: Software livre para posicionamento GNSS padrão e preciso**

  http://www.rtklib.com/

Posicionamento vertical com GNSS

- **MAPGEO2015**

  http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm

- **GeoideAr16**

  http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Geoide-Ar16

5. Outros Métodos Geodésicos Espaciais

- VLBI
- SLR/LLR
- DORIS
- Altimetria por satélites
- Gravimetria por satélites

Outros Métodos Geodésicos Espaciais

PASSIVOS: não emitem sinais mas somente recebem de fontes remotas

ATIVOS: emitem e recebem sinais

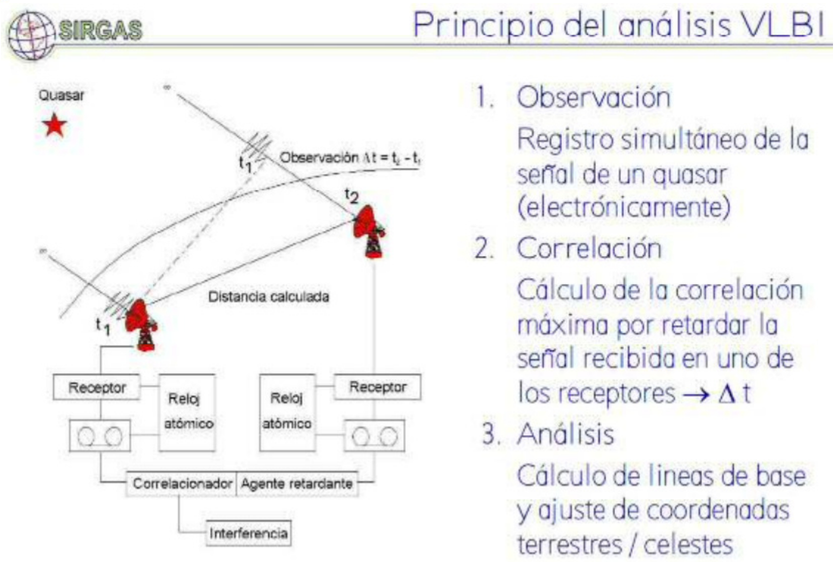
(fonte: Freitas, 2013)

VLBI – Very Long Baseline Interferometry

- Técnica geodésica espacial baseada em rádio astronomia desenvolvida nos anos 70
- Rádio-interferômetro: um par de antenas direcionais (rádiotelescópios) recebem sinais de ondas de rádio emitidos por objetos extragaláticos (quasares)
- Sinal do quasar é recebido e gravado pela estação VLBI com tempo preciso (estabilidade ~10^{-12}s $\Rightarrow$ 3mm)
- Atraso no recebimento do sinal entre as duas estações é utilizado para estimar a posição das estações com precisão melhor que 1cm, e a velocidade relativa pode ser medida com observações de vários anos

(fonte: Freitas, 2013)

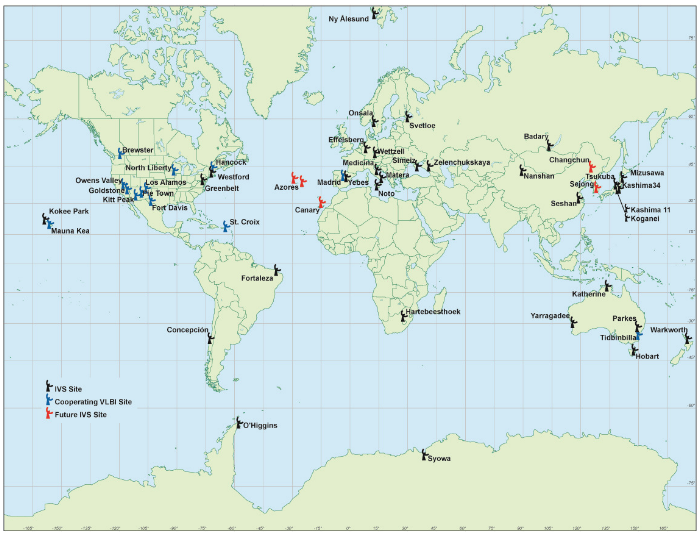
VLBI – Very Long Baseline Interferometry



(fonte: Escuela SIRGAS en Sistemas de Referencia, 2011)

International VLBI Service (IVS)

Rede VLBI



~30 estações (ref. nov 2016)

(fonte: http://ivscc.gsfc.nasa.gov/)

VLBI – Very Long Baseline Interferometry

- **Aplicações**
  - Fornece escala e orientação ao Terrestrial Reference Frame (TRF)
  - Determinação dos Parâmetros de Orientação da Terra (EOP)
  - Conexão com o International Celestial Reference Frame (ICRF)
  - Única ferramenta para a determinação das coordenadas de quasares
  - Vários parâmetros geodinâmicos, astronômicos e meteorológicos

(fonte: Freitas, 2013)

SLR – Satellite Laser Ranging

- Técnica que se baseia na medição do tempo de percurso de um sinal laser desde a estação terrestre até o refletor no satélite e retorno à estação (Terra-Satélite-Terra)

(fonte: Plag & Pearlman, 2009, apud Freitas, 2013)

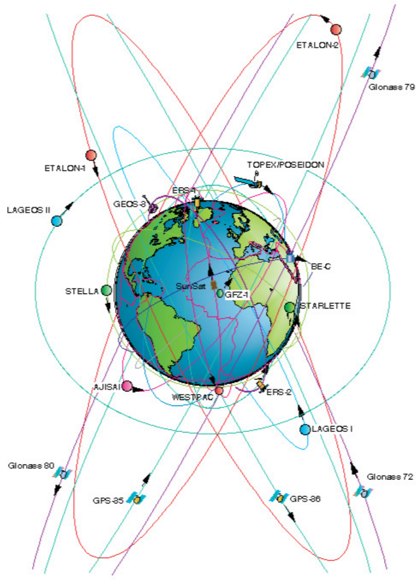
SLR – Satellite Laser Ranging

- Provê medidas com precisão milimétrica que ajudam no estabelecimento e manutenção do ITRF e suporte à determinação das órbitas precisas
- Grande parte dos satélites vinculados às aplicações geodésicas tem retrorefletores para uso desta técnica
- Atividades coordenadas pelo ILRS, tendo por base uma rede de cerca de 50 estações
- Aplicações
  - Fornece escala para o TRF
  - É a técnica fundamental para determinação do geocentro, com o monitoramento a nível milimétrico das variações na localização do centro de massa do Sistema Terra total (Terra sólida, atmosfera e oceanos)
  - Detecção e monitoramento do movimento das placas tectônicas, deformação crustal, rotação da terra e movimento do polo

(fonte: adaptado de Freitas, 2013)

SLR – Satellite Laser Ranging

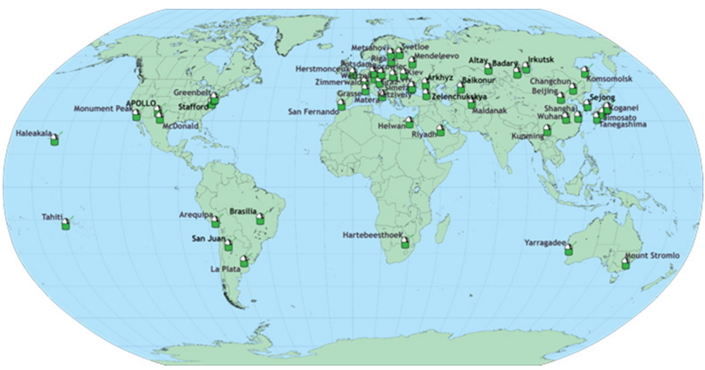
Missões que suportam SLR



(fonte: https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/index.html)

International Laser Ranging Service (ILRS)

Rede ILRS



~50 estações (ref. mar 2017)

(fonte: http://ilrs.gsfc.nasa.gov/)

SLR – Satellite Laser Ranging

- Para o *Reference Frame* o *LAser GEOdynamics Satellite* (LAGEOS) 1 e 2 é fundamental, pois tem forma esférica e massa elevada proporcionalmente à área, o que possibilita estabilidade orbital de longo prazo para a mensuração da dinâmica da Terra.

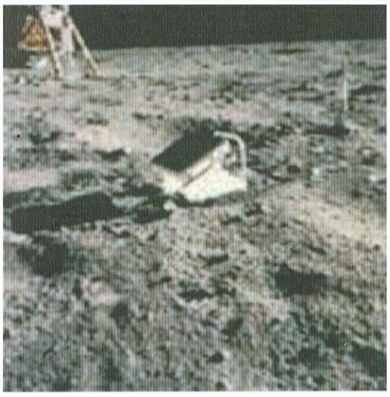
Satélite LAGEOS-1

Diâmetro 60cm
Peso ~400kg

(fonte: Plag & Pearlman, 2009, apud Freitas, 2013)

LLR – Lunar Laser Ranging

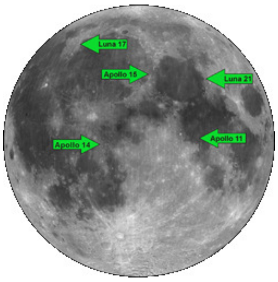
- Mesmo princípio do SLR, com retrorefletores instalados na Lua.



(fonte: Plag & Pearlman, 2009, apud Freitas, 2013)

LLR – Lunar Laser Ranging

Refletores na lua



Observatórios LLR

(fonte: https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/science/scienceContributions/lunar.html

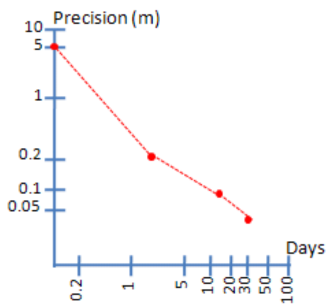
LLR – Lunar Laser Ranging

- **Aplicações**
  - Determinação de parâmetros que descrevem:
    - Efemérides lunares
    - Física lunar
    - Interior da lua
    - Vários Reference Frames
    - Parâmetros de orientação da Terra
    - Dinâmica Terra-Lua

(fonte: Freitas, 2013)

DORIS - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

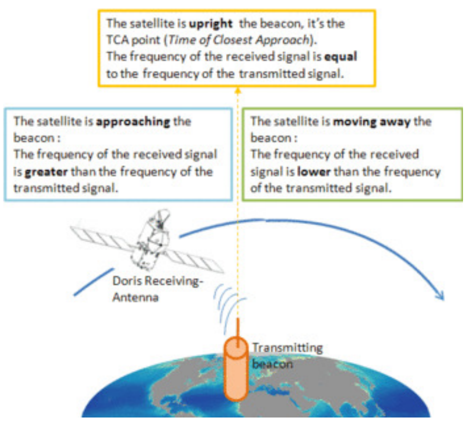
- **Principal objetivo**: determinação das órbitas precisas dos satélites – acurácia na ordem do centímetro
  - Cálculo da órbita: baseada em modelo comparado com as medidas obtidas pelo DORIS; acurácia aumenta com o acúmulo de medidas



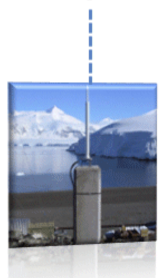
(fonte: http://www.aviso.oceanobs.com/en/doris/principle.html apud Freitas, 2013)

DORIS - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

- **Princípio de funcionamento**
  - **Efeito Doppler**: diferença entre o comprimento de onda emitido e recebido de objetos em movimento relativo



Antena a bordo do satélite

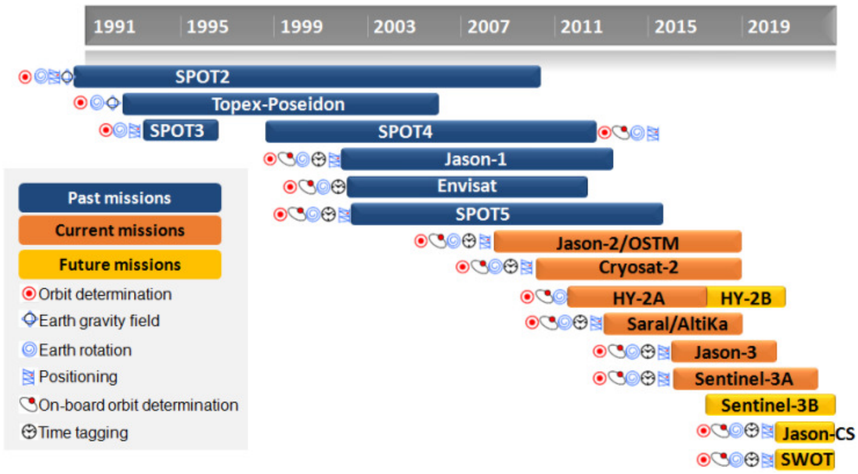


Antena da estação no solo

(fonte: http://www.aviso.oceanobs.com/en/doris apud Freitas, 2013)

DORIS - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

- **Missões e aplicações**



(fonte: http://www.aviso.oceanobs.com/en/doris/doris-applications.html apud Freitas, 2013)

International DORIS Service (IDS)

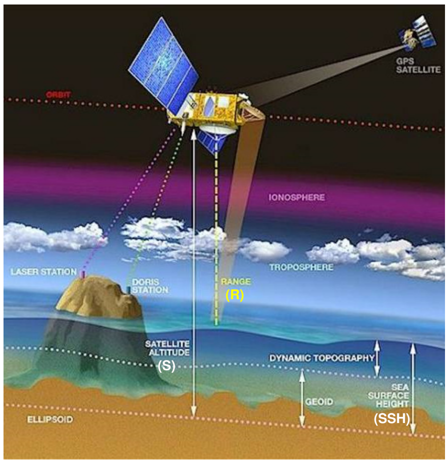
Rede DORIS

96 estações no total, ~60 operacionais (ref. nov 2016)

(fonte: http://ids-doris.org/)

Altimetria por Satélites

- **Princípio de funcionamento**
  - Radar altímetro: medidas de altitude da superfície instantânea (mar, gelo), em relação ao elipsoide de referência
  - Altímetro emite o sinal para a Terra, e recebe o eco da superfície do oceano, após a sua reflexão. A altitude do oceano é representada pela distância satélite-superfície e a posição do satélite em relação a uma superfície de referência arbitrária (elipsoide de referência)
  - A posição acurada do satélite é determinada pelo sistema DORIS
  - As perturbações referentes à refração atmosférica, efeitos geofísicos e outros são corrigidos por modelos

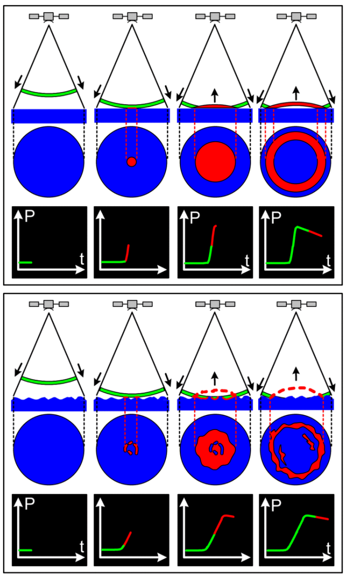


SSH = S - R

(fonte: http://www.aviso.oceanobs.com/en/altimetry/principle/basic-principle.html apud Freitas, 2013)

Altimetria por Satélites

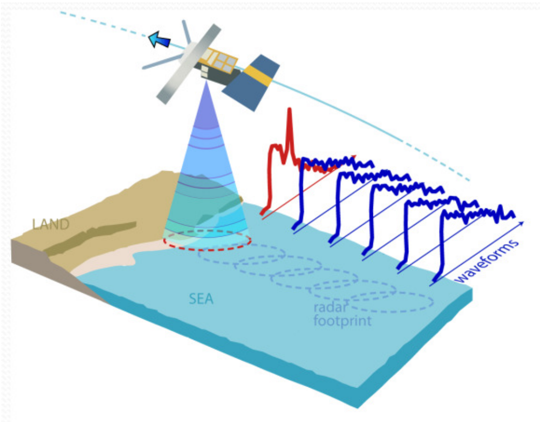
- **Reflexão do pulso**
  - Radar altímetro recebe o eco refletido, que varia em intensidade com o tempo. Onde a superfície do oceano é plana, a amplitude da onda refletida aumenta bruscamente desde o momento em que o sinal do radar atinge a superfície
  - Em mares agitados ou com muitas ondas, o sinal atinge a crista de uma onda e então uma série de outras cristas que fazem com que o aumento da amplitude da onda refletida seja mais gradual
  - Da onda refletida pode ser derivada a altura da onda do mar, tendo em vista que a inclinação da curva que representa sua amplitude ao longo do tempo é proporcional à altura da onda



(fonte: http://www.aviso.oceanobs.com/en/altimetry/principle/pulses-and-waveforms.html apud Freitas, 2013)

Altimetria por Satélites

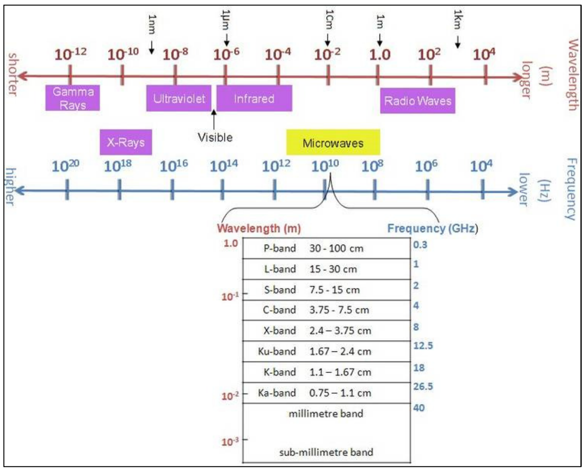
- **Degradação do sinal na costa**
  - Quando o satélite altímetro se aproxima da costa, a entrada do footprint em terra modifica a forma da onda (em vermelho na figura), tornando a estimativa da distância superfície-satélite e outras quantidades derivadas mais difícil



(fonte: http:// www.coastalt.eu/coastalt-short-web-summary apud Freitas, 2013)

Altimetria por Satélites

- **Exemplos de frequências utilizadas**
  - **K_u** (13,6 GHz): mais comum (Topex/Poseidon, Jason-1, ...)
  - **C** (5,3 GHz): Sensível à perturbação ionosférica, combinada com **K_u**
  - **S** (3,2 GHz): Combinada com Ku
  - **K_a** (35 GHz): Boa detecção do gelo, chuva, zonas costeiras, altura das ondas, ...



(fonte: http://www.aviso.oceanobs.com/en/altimetry/principle/frequencies-used.html apud Freitas, 2013)

Altimetria por Satélites

- **Missões**
  - **No passado**

    Skylab, GEOS 3, Seasat (primeiras)
    Geosat
    ERS-1
    Topex/Poseidon (de maior sucesso!)
    GFO
    ERS-2
    Envisat
    Jason-1
  - **No presente**

    Jason-2
    Cryosat
    HY-2A
    Saral
    Sentinel 3
    Jason-3
  - **No futuro**

    Jason-CS
    SWOT

(fonte: http://www.altimetry.info/missions/)

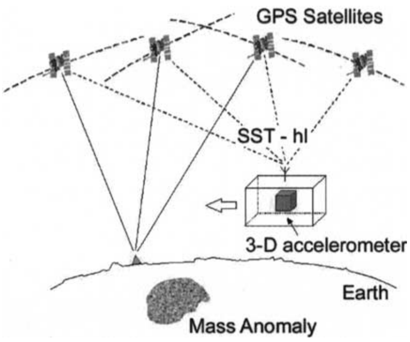
Gravimetria por Satélites

- **Por que é necessário conhecer a gravidade?**
  - O campo da gravidade reflete as heterogeneidades de massa no interior da terra e na superfície
  - É fundamental na determinação do geoide
- **Principal objetivo das missões gravimétricas**
  - Fornecer modelos globais e regionais do campo da gravidade e do geoide
- **Acurácia e resolução espacial sem precedentes!**

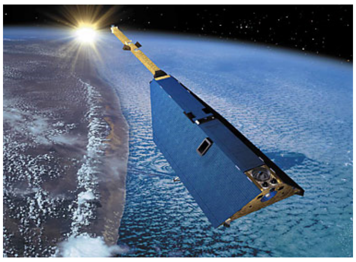
(fonte: Freitas, 2013)

Gravimetria por Satélites - Missões

- **CHAMP - CHAllenging Mini-satellite Payload (2000-2010)**
  - High-low (HL) Satellite-to-satellite tracking (SST)
    - Órbita do satélite LEO determinada por satélites de órbita mais alta (GPS)
    - Forças não gravitacionais medidas pelo acelerômetro são deduzidas da força total que atua no satélite para determinar o valor da gravidade



(fonte: Johanessen et al., 2003)

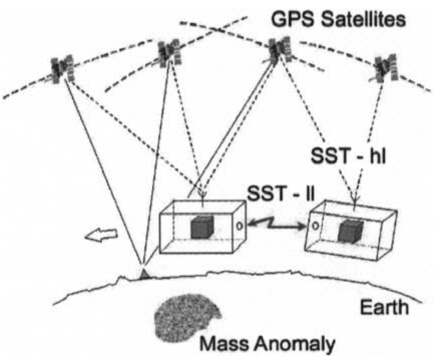


(fonte: http://www.dlr.de)

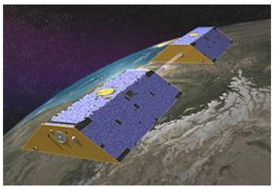
(fonte: adaptado de Freitas, 2013)

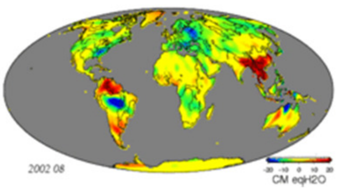
Gravimetria por Satélites - Missões

- **GRACE - Gravity Recovery And Climate Experiment (2002-…)**
  - Low-low (LL) Satellite-to-satellite tracking (SST)
    - Dois satélites idênticos na mesma órbita separados por ~220km
    - Medida a diferença de aceleração entre os dois satélites



(fonte: Johanessen et al., 2003)



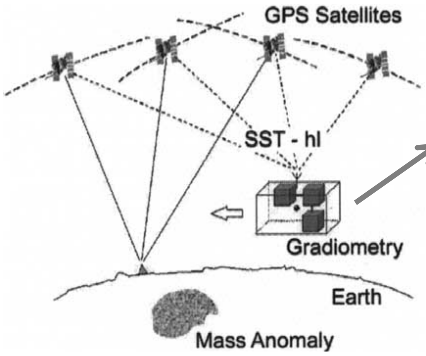


(fonte: https://en.wikipedia.org/)

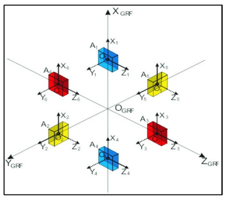
(fonte: adaptado de Freitas, 2013)

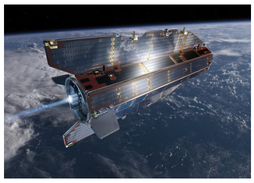
Gravimetria por Satélites - Missões

- **GOCE - Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer (1999-2013)**
  - Satellite gravity gradiometry
    - Diferenças de aceleração são medidas diretamente no satélite, em três direções espaciais de seis acelerômetros
    - Sinal medido corresponde ao gradiente da gravidade



(fonte: Johanessen et al., 2003)


(fonte: http://www.iapg.bgu.tum.de)


(fonte: http://www.sron.nl)

(fonte: adaptado de Freitas, 2013)

Gravimetria por Satélites

- Modelos Globais do Campo da Gravidade

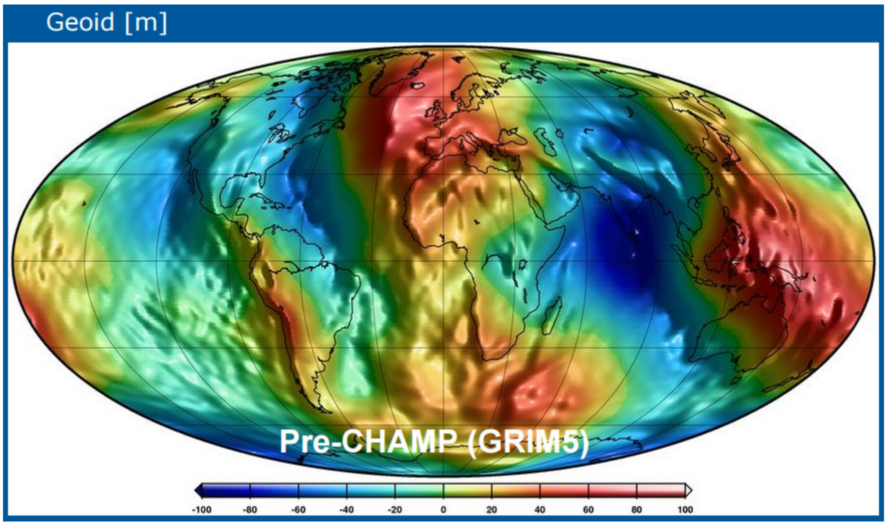
Nr ▲	Model ⇅	Year ⇅	Degree ⇅	Data ⇅	Reference ⇅	download	calculate	show	doi
158	HUST-Grace2016s	2016	160	S(Grace)	Zhou Hao et al, 2016	gfc zip	calculate	show	✓
157	ITU_GRACE16	2016	180	S(Grace)	Akyilmaz et al, 2016b	gfc zip	calculate	show	✓
156	ITU_GGC16	2016	280	S(Grace,Goce)	Akyilmaz et al, 2016a	gfc zip	calculate	show	✓
155	EIGEN-6S4v2	2016	300	S(Goce,Grace,Lageos)	Förste et al, 2016	gfc zip	calculate	show	✓
154	GOCO05c	2016	720	S,G,A (see model)	Pail, et al. 2016	gfc zip	calculate	show	✓
153	GGM05C	2016	360	S(Grace,Goce),G,A	Ries et al, 2016	gfc zip	calculate	show	✓
152	GECO	2015	2190	S(Goce),EGM2008	Gilardoni et al, 2015	gfc zip	calculate	show	
151	GGM05G	2015	240	S(Grace,Goce)	Bettadpur et al, 2015	gfc zip	calculate	show	
150	GOCO05s	2015	280	S(see model)	Mayer-Gürr, et al. 2015	gfc zip	calculate	show	
149	GO_CONS_GCF_2_SPW_R4	2014	280	S(Goce)	Gatti et al, 2014	gfc zip	calculate	show	
148	EIGEN-6C4	2014	2190	S(Goce,Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2015	gfc zip	calculate	show	✓
147	ITSG-Grace2014s	2014	200	S(Grace)	Mayer-Gürr et al, 2014	gfc zip	calculate	show	
146	ITSG-Grace2014k	2014	200	S(Grace)	Mayer-Gürr et al, 2014	gfc zip	calculate	show	
145	GO_CONS_GCF_2_TIM_R5	2014	280	S(Goce)	Brockmann et al, 2014	gfc zip	calculate	show	
144	GO_CONS_GCF_2_DIR_R5	2014	300	S(Goce,Grace,Lageos)	Bruinsma et al, 2013	gfc zip	calculate	show	
143	JYY_GOCE04S	2014	230	S(Goce)	Yi et al, 2013	gfc zip	calculate	show	
81	EIGEN-2	2003	140	S(Champ)	Reigber et al, 2003b	gfc zip	calculate	show	
80	EIGEN-1	2002	119	S(Champ)	Reigber et al, 2003a	gfc zip	calculate	show	
79	EIGEN-1S	2002	119	GRIM5,S	Reigber et al, 2002	gfc zip	calculate	show	
78	PGM2000A	2000	360	S,G,A	Pavlis et al, 2000	gfc zip	calculate	show	
77	TEG4	2000	180	S,G,A	Tapley et al, 2000	gfc zip	calculate	show	
76	GRIM5C1	1999	120	S,G,A	Gruber et al, 2000	gfc zip	calculate	show	
75	GRIM5S1	1999	99	S	Biancale et al, 2000	gfc zip	calculate	show	
74	GRIM4S4G	1999	100	GRIM4S4,S(GFZ-1)	König et al, 1999	gfc	calculate	show	
73	GFZ97	1997	359	PGM062w,G,A	Gruber et al, 1997b	gfc zip	calculate	show	
72	EGM96	1996	360	EGM96S,G,A	Lemoine et al, 1998	gfc zip	calculate	show	
3	OSU68	1968	14	S,G	Rapp, 1968	gfc	calculate	show	
2	WGS66	1966	24	G	WGS Committee, 1966	gfc	calculate	show	
1	SE1	1966	15	S	Lundquist and Veis, 1966	gfc	calculate	show	

(Data: S = Satellite Tracking Data, G = Gravity Data, A = Altimetry Data)

(fonte: http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM)

Gravimetria por Satélites

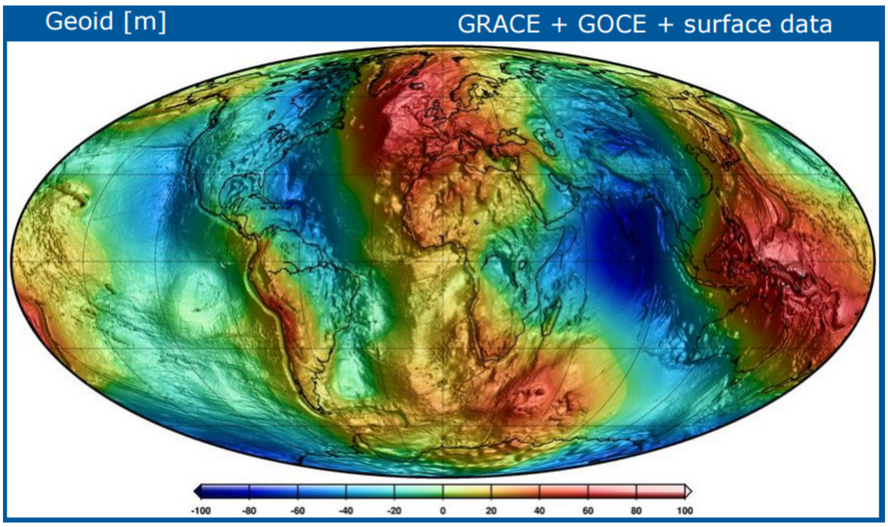
- Contribuição para a melhoria dos modelos geoidais globais



(fonte: http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/GlobalModelsICGEM.pdf)

Gravimetria por Satélites

- Contribuição para a melhoria dos modelos geoidais globais



(fonte: http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/GlobalModelsICGEM.pdf)