

Revista Brasileira de Cartografia (2011) N° 63/5: 633-648
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

O CONCEITO ATUAL DOS REFERENCIAIS USADOS EM GEODÉSIA

The Present Concepts of the Reference Systems Used in Geodesy

**Denizar Blitzkow¹, Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos¹,
Gabriel do Nascimento Guimarães¹ & Sônia Maria Alves Costa²**

¹ Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP-PTR

Laboratório de Topografia e Geodesia

Caixa Postal 61548, CEP: 05424-970, São Paulo, São Paulo, Brasil.

Tel (5511) 3091-5501 - Fax (5511) 3091-5716

dblitzkow@usp.br

acocmatos@gmail.com

gabrielguimaraes33@hotmail.com

² Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE

Diretoria de Geociências – DGC / Coordenação de Geodésia – CGED

Av Brasil 15671 - B.3A sala 1, Parada de Lucas CEP: 21241-051, Rio de Janeiro RJ Brasil.

Tel (5521) 2142-4929 - Fax (5521) 2142-4859

sonia.alves@ibge.gov.br

Recebido em 09 Junho, 2011/ Aceito em 23 Agosto, 2011

Received on June 09, 2011/ Accepted on August 23, 2011

RESUMO

A Era Espacial permitiu desenvolver tecnologias e metodologias de observação que levaram ao estudo de fenômenos até então impossível de ser realizado. Pode-se citar o deslocamento das placas litosféricas, as marés terrestres e oceânicas, os movimentos do eixo de rotação da Terra, as variações da velocidade de rotação da mesma, o movimento dos satélites artificiais, etc. A qualificação e a quantificação destes fenômenos exigem o estabelecimento de referenciais adequados. Após anos de estudo e análise concluiu-se que dois referenciais seriam suficientes para quantificar todos os fenômenos relacionados com os interesses da Geodesia, da Geofísica, da engenharia e da geodinâmica: o referencial terrestre e o referencial celeste. A conceituação, a definição e a realização dos referenciais constituem as etapas naturais para o seu estabelecimento e a sua manutenção. Através de observações espaciais, seja a corpos celestes seja aos satélites artificiais, os referenciais são materializados. O presente trabalho apresenta uma descrição geral da evolução dos referenciais na era moderna, de seu estabelecimento e de sua manutenção, função atribuída atualmente ao IERS.

Palavras chaves: Referencial Terrestre, Referencial Celeste.

ABSTRACT

The Space Era brought the attention to methodologies of observation that allowed the study of phenomena impossible to be considered a few tens of years ago. The lithospheric plates, the earth and ocean tides, the movements of the Earth rotation axis, the change in the angular velocity, the movements of artificial satellites are some examples. The qualification

and quantification of these phenomena are only possible if convenient reference systems are established. After many years of analysis and research the attention was addressed to two reference coordinate systems: a terrestrial reference system and a celestial reference system. They are sufficient to deal with all geodetic, engineering and geodynamic phenomena. The concept, the definition and the materialization are the natural steps for the establishment and for the maintenance of the reference systems. The materialization is carried out through the observation of satellites as well as space objects. This paper is intended to present a description on the evolution of the reference systems and the present maintenance on the responsibility of IERS.

Keywords: Terrestrial Reference, Celestial Reference.

1. INTRODUÇÃO

Conforme o dicionário Webster, “Geodesia é um ramo da matemática aplicada que se preocupa com a determinação do tamanho e da forma da Terra, com a exata posição de pontos sobre a sua superfície e com a descrição das variações do seu campo de gravidade”. Com certeza a Geodesia atual vai muito além disso; não é simples matemática aplicada e nem se dedica exclusivamente a um processo de observações.

Entre muitos exemplos de fenômenos com os quais a Geodesia tem envolvimento, sabe-se que a atmosfera é a fonte principal de excitação da rotação da Terra em escala sazonal e interanual. Em consequência, o momento angular da Terra (duração do dia) é muito correlacionado com o momento angular atmosférico (MAA) axial. Além disso, incertezas do vapor de água na atmosfera e os seus efeitos na propagação de sinais são reconhecidamente algo que merecem a atenção no uso do VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e do SLR (*Satellite Laser Range*). Estes fenômenos vêm integrando a Meteorologia com a Geodesia e são estudados e analisados através de redes GNSS de monitoramento contínuo. A análise das observações destas redes permite ainda a determinação do TEC (*Total Electron Content*) na ionosfera (MATSUOKA e CAMARGO, 2004).

Outro exemplo a ser citado é o monitoramento dos movimentos da litosfera através das técnicas espaciais, principalmente o GNSS. Países com grande atividade sísmica, tal como o Japão, investem no estabelecimento de redes GNSS as quais têm por objetivo auxiliar na previsão dos sismos, integrando assim a Geofísica com a Geodesia.

Mas não fica por aí as interações da Geodesia com outras atividades. O objetivo primordial do GNSS, posicionamento instantâneo com precisão

de poucos metros, tem aplicação na navegação terrestre, aérea e marítima; no controle de frotas com consequências positivas na logística de transportes; na agricultura de precisão com benefícios na avaliação da produtividade e no uso racional dos insumos agrícolas. Além disso, as medidas precisas (centimétricas) do GNSS, possíveis através da técnica de ‘Fase de Batimento da Portadora’, permitem aplicações na área da engenharia tanto na locação de obras quanto no monitoramento de grandes estruturas.

Além do aprimoramento das técnicas espaciais de posicionamento, as modernas missões CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e a mais recente GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*), este lançado ao espaço no dia 17 de março de 2009, vêm permitindo vislumbrar novos desafios. Um ponto importante a focalizar é a variação no tempo do campo gravitacional. Avaliações do referido campo através de satélites já indicaram avanços consideráveis no entendimento da estrutura e da dinâmica núcleo/manto, da estrutura térmica e dinâmica na litosfera, da circulação oceânica e da tectônica de placas (DICKY, 2001).

Observa-se, desde o início do último século, um desequilíbrio progressivo do efeito estufa devido a um aumento de certos gases na atmosfera, em particular, o CO₂. A consequência direta é o aumento constante da temperatura da Terra. Um dos efeitos imediatos é a elevação do nível médio do mar que vinha ocorrendo, em caráter global, à taxa média de 1 – 3 mm/ano no último século. As fontes para a elevação do nível do mar ainda são incertas. A expansão térmica dos oceanos é, com certeza, a mais importante. Mas o derretimento das geleiras nas altas montanhas e nas calotas polares certamente contribui de forma considerável. Isto acarreta numa redistribuição de massa cujo efeito é a variação, no

tempo, do campo gravitacional e, portanto, da superfície geoidal (CAZENAVE *et al.*, 2006).

No passado se dividia a Geodesia em física, geométrica e espacial. Esta divisão perdeu sua razão de ser em função da interação que existe, hoje mais do que no passado em razão da Era Espacial, entre as metodologias que envolvem as atividades pertinentes às três áreas. A tendência atual é identificar três objetos distintos da Geodesia: a geometria e as deformações da Terra, os parâmetros de orientação do planeta no espaço e o campo de gravidade envolvendo o geoide. Enfim, pode-se concluir que a Geodesia tem um envolvimento muito grande com várias atividades da Geociência e da Engenharia.

2. A GEODESIA E A ASTRONOMIA

A Geodesia tem uma estreita e antiga relação com a Astronomia no que diz respeito ao estabelecimento de referenciais. A Astronomia basicamente se dedica à observação dos corpos celestes: estrelas, planetas, cometas, quasares, etc., a partir de suas radiações luminosas. A observação dos astros pela Astronomia é muito antiga e remonta aos gregos a primeira concepção de um modelo de movimento para os corpos celestes. Platão (séc. IV a.C.), Pitágoras (séc. VI a.C.), Eratóstenes (séc. IV a.C.), entre outros, ligaram seus nomes às observações e aos estudos astronômicos. Neste sentido, eles conceberam a ideia da esfera celeste onde estariam fixos de certa forma todos os corpos celestes, sendo que a mesma giraria entorno da Terra: sistema geocêntrico. Este conceito persistiu até Copérnico (séc. XVI) com sua publicação *On the Revolutions of the Celestial Sphere* (COPERNICUS, 1992). Considerando que inúmeros fenômenos astronômicos não tinham explicação num sistema geocêntrico, ele concebeu a ideia de que os planetas, inclusive o sistema Terra-Lua, girariam entorno do Sol. Para fugir do furor da Igreja ele dizia que não acreditava nesta realidade, mas que seu enunciado simplesmente tinha um caráter matemático para explicar aqueles fenômenos. Isto deu lugar ao conceito do sistema heliocêntrico. Galileo Galilei (1564-1642)¹ consagrou o novo conceito do sistema em sua obra *Istoria e dimonstrazione intorno alle macchie solari* (GALILEO, 1613). Entretanto, um

equacionamento completo das discrepâncias entre as observações e a teoria só foi concretizado com o enunciado das leis de Kepller (1571-1630), oriundas das observações de Ticho Brahe (1546-1601).

A Astronomia possui três razões para realizar observações aos astros. Um dos primeiros interesses das antigas civilizações pela observação das estrelas foi quantificar a emissão de luz das mesmas, objeto da fotometria. Registros muito antigos da astronomia já classificavam os corpos celestes em ordem de grandeza em função da intensidade luminosa que chegava ao observador. Por outro lado, observando uma estrela em diferentes épocas, pode-se verificar se a luminosidade varia com o tempo. O estudo desta variabilidade leva a vários fenômenos associados às estrelas: pulsação, sistemas múltiplos, explosões, micro lentes gravitacionais, etc. Outro interesse bastante antigo é pela posição do astro, objeto da astrometria. Embora o fundamental seja pela posição espacial, o não conhecimento das distâncias da grande maioria dos astros faz com que, quase sempre, a palavra posição signifique a direção de onde vem a luz, isto é, a posição do astro na esfera celeste. Neste aspecto, há diversas possibilidades de posicionar o astro, mas a que se mostrou mais conveniente, por independer do movimento de rotação da Terra, foi através das coordenadas equatoriais (uranográficas), a ascensão reta e a declinação. Esta aplicação une mais intimamente a Geodesia e a Astronomia. Finalmente, nas últimas décadas foi possível desenvolver sensores para medir o espectro das radiações oriundas das estrelas, caracterizando a espectroscopia. Entre outras possibilidades, consegue-se identificar a existência e a falta de raias de comprimentos distintos de onda no espectro. Isto leva a conclusões sobre, por exemplo, a constituição físico-química do astro. Hoje está ganhando muita importância a denominada bioastronomia que objetiva a busca pela origem da existência de vida na Terra.

Para a Geodesia, a astrometria caracteriza a aplicação mais fundamental. Essa alternativa de observação, conduzida através de um equipamento ótico (telescópio) ou mais recentemente eletrônico (a antena de VLBI), permite a definição e a materialização do sistema celeste de referência

¹ Observação: Galileo enfrentou também a intransigência eclesiástica com o literalismo bíblico, resultando em sua condenação. Com efeito, o conceito do sol como centro do movimento planetário contrariava as afirmações bíblicas.

através dos quasares. Estes são fontes emissoras de ondas de rádio, ou seja, são objetos astronômicos distantes e poderosamente energéticos.

Por outro lado, para entender conceitos a serem estabelecidos é essencial considerar certos fenômenos associados com a observação de um astro. O primeiro deles é a paralaxe. Trata-se da aparente mudança de posição (direção) do corpo celeste (deslocamento paralático) que ocorre quando se muda a posição do observador. Isto tem origem em distintos aspectos relacionados ao observador. A observação em instantes diferentes do dia resulta numa paralaxe chamada diária, fruto do deslocamento do ponto de observação em consequência do movimento de rotação da Terra. Por outro lado, se o observador estiver sobre a superfície da Terra ou for imaginado no centro de massa da mesma, haverá uma paralaxe devido ao deslocamento correspondente. Além disso, a Terra tem seu movimento de translação ao redor do Sol, o que resulta na chamada paralaxe anual, com diferentes direções do astro em épocas distintas do ano. A paralaxe é um fenômeno relativo. Por exemplo, segurando um lápis na mão com o braço estendido, sentir-se-á uma mudança de direção da vista direita para a esquerda. Se o mesmo lápis for mantido a poucos metros do observador, a mudança de direção de uma para a outra vista desaparece. Neste caso o fenômeno reaparece se a pessoa se deslocar um ou dois passos para o lado. No caso dos astros, a paralaxe diária pode desaparecer se o astro estiver suficientemente distante. Mesmo a paralaxe anual desaparece para astros ainda mais distantes. Assim sendo, a observação do astro a partir da superfície física da Terra resulta na determinação de direções que diz-se vinculadas a um referencial topocêntrico. Se houver necessidade de referir as direções ao **geocentro** ou ao baricentro do sistema solar é preciso vincular a observação a objetos estelares específicos, muito distantes (Seção 5). Um segundo fenômeno é a aberração. A título de ilustração, observe-se o que ocorre com um transeunte em dia de chuva: parado, na presença de uma chuva sem vento, ele observa os pingos caindo verticalmente; ao se deslocar, a sensação é de que os pingos caem inclinados vindos à direção contrária ao movimento e, espontaneamente, inclina o guarda-chuva. Como consequência dos movimentos do observador (rotação e translação) e do fato da velocidade da luz ser finita, este mesmo fenômeno

deslocará a luz que é recebida dos astros na direção do movimento do observador.

Em função dos movimentos de um observador na superfície da Terra, eventualmente com acelerações não desprezíveis, a utilização do baricentro do sistema solar como origem de um sistema de referência representa uma aproximação muito melhor de um referencial inercial. Isto é possível dentro da relatividade geral (IERS, 2010).

3. COORDENADAS GEODÉSICAS E CARTESIANAS

Segundo (GEMAEL, 1981) “até há bem pouco, os geodestas se valiam de dois escalares - a latitude (ϕ_G) e a longitude (λ_G) para definir, não a posição de um ponto P sobre a superfície física da Terra, mas de sua projeção P' sobre a superfície do modelo de referência adotado, o elipsoide de revolução; um terceiro escalar - a altitude ortométrica (H) - relacionava o ponto P com o geoide (superfície equipotencial fundamental do campo de gravidade)”. Este terceiro número, de natureza física e não geométrica como os anteriores, não constitui com aqueles um conjunto capaz de fixar a posição de um ponto no espaço. Primeiramente as duas redes, horizontal (triangulação, ϕ e λ) e vertical (nivelamento, H), do ponto de vista clássico, eram independentes. Em segundo lugar, a altitude ortométrica não estabelece a posição do ponto em relação ao elipsoide, mas sim ao geoide. Finalmente, há que ressaltar que a determinação da altitude ortométrica depende do conhecimento da distribuição de densidades no interior da crosta. Os modelos existentes de tal distribuição ainda são insuficientes para o cálculo da altitude ortométrica a partir do nivelamento geométrico, ao menos em caráter continental e dentro das precisões exigidas, isto é, na Geodesia e na Engenharia.

A partir da década de 60, com o desenvolvimento da Geodesia tridimensional através do posicionamento por satélite, foi possível expressar a posição tridimensional de um ponto, permitindo assim obter as coordenadas cartesianas (y_1, y_2, y_3) do centro elétrico da antena numa estação de rastreamento, referidas a um terno cartesiano “geocêntrico” (Y_1, Y_2, Y_3). Tais coordenadas podem ser convertidas para curvilíneas (ϕ, λ, h) adotando-se uma superfície matemática de referência, ou seja, um elipsoide, onde h representa

a altitude geodésica ou elipsoidal, consistente com as duas outras coordenadas em função do elipsoide adotado (Fig. 1).

4. REFERENCIAIS: MOTIVAÇÃO E CONCEITUAÇÃO

A Terra, seu meio ambiente e os corpos celestes em geral, não são estáticos: deslocam-se, giram e podem se deformar. Vários fenômenos dinâmicos podem ser citados como exemplos:

- movimentos de placas da litosfera: inter-placa e intra-placa;
- marés oceânicas e terrestres;
- efeitos de carga sobre a crosta (e.g., soerguimento pós-glacial);
- movimento de rotação;
- deslocamento do eixo de rotação;
- comportamento dinâmico do sistema Terra-Lua;
- movimento dos planetas e dos satélites;
- monitoramento de estruturas de engenharia, etc.

O estudo qualitativo e quantitativo de tais fenômenos exige o estabelecimento de referenciais adequados. A era moderna, valendo-se das técnicas espaciais, conseguiu aprofundar os estudos e chegou a uma conclusão definitiva em relação ao problema da referência. As etapas necessárias para o estabelecimento de um sistema de referência estão equacionadas em (OLIVEIRA, 1998) e são assim enunciadas:

1. Conceito;
2. Definição;
3. Materialização;
4. Densificação.

Do ponto de vista **conceitual** um referencial ideal seria aquele em que a origem seguisse a lei newtoniana da inércia (se mantivesse em repouso ou em movimento retilíneo uniforme). Um referencial em que a origem seja o centro de massa da Terra não pode ser definido como inercial por força do movimento de translação, que implica numa aceleração da origem. Esta aceleração é pequena e daí a razão para qualificar o referencial de “quase-inercial”. Porém, se a origem for transladada para o baricentro do sistema solar, o que é possível no contexto da relatividade geral, o sistema passa a ser inercial. Além disso, é necessário um referencial cujos eixos coordenados sejam fixos no espaço, tanto em relação à origem quanto à orientação, ou

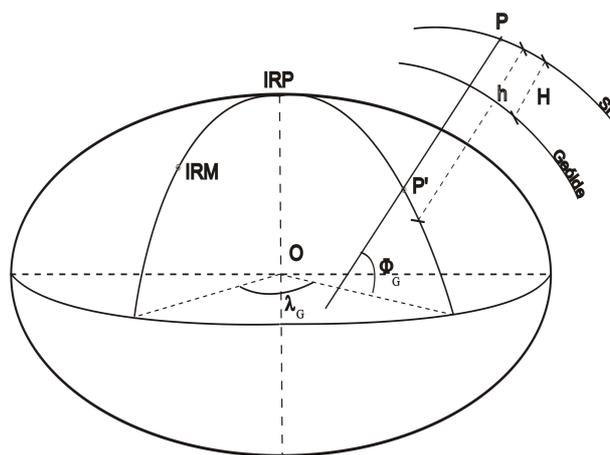


Fig. 1 – Representação das coordenadas geodésicas no elipsoide.

estejam sujeitos a variações no tempo bem conhecidas em relação a algo fixo. A questão relacionada com a orientação dos eixos é complicada até certo ponto, em função dos fenômenos que envolvem o movimento do eixo de rotação da Terra; a era moderna permitiu um equacionamento adequado através do referencial celeste.

Por outro lado, para que seja possível a realização de comparações é necessário adotar “convencionalmente” uma **definição** do referencial. Para isso são estabelecidos princípios que fixam a origem, a orientação dos eixos e a escala de sistemas de coordenadas.

Através de observações levadas a efeito a partir de pontos devidamente materializados sobre a superfície da Terra e conduzidos sobre objetos adequados para o caso, estabelece-se um conjunto de coordenadas de referência para os pontos. Este conjunto de pontos constitui uma rede de referência, de caráter global, utilizada para vincular outras determinações. Um exemplo de uma rede de referência é a do IGS (*International GNSS Service*) (Figura 2) a qual usa o sistema GNSS na obtenção da posição dos pontos de sua rede.

As redes com características globais implicam numa distribuição de pontos separados por centenas e até milhares de quilômetros. As necessidades práticas, bem como as técnicas de obtenção de coordenadas vinculadas a uma referência global, exigem o estabelecimento de redes com um espaçamento da ordem de poucas dezenas de quilômetros entre os pontos materializados. Isto implica na implantação de pontos de **densificação**,

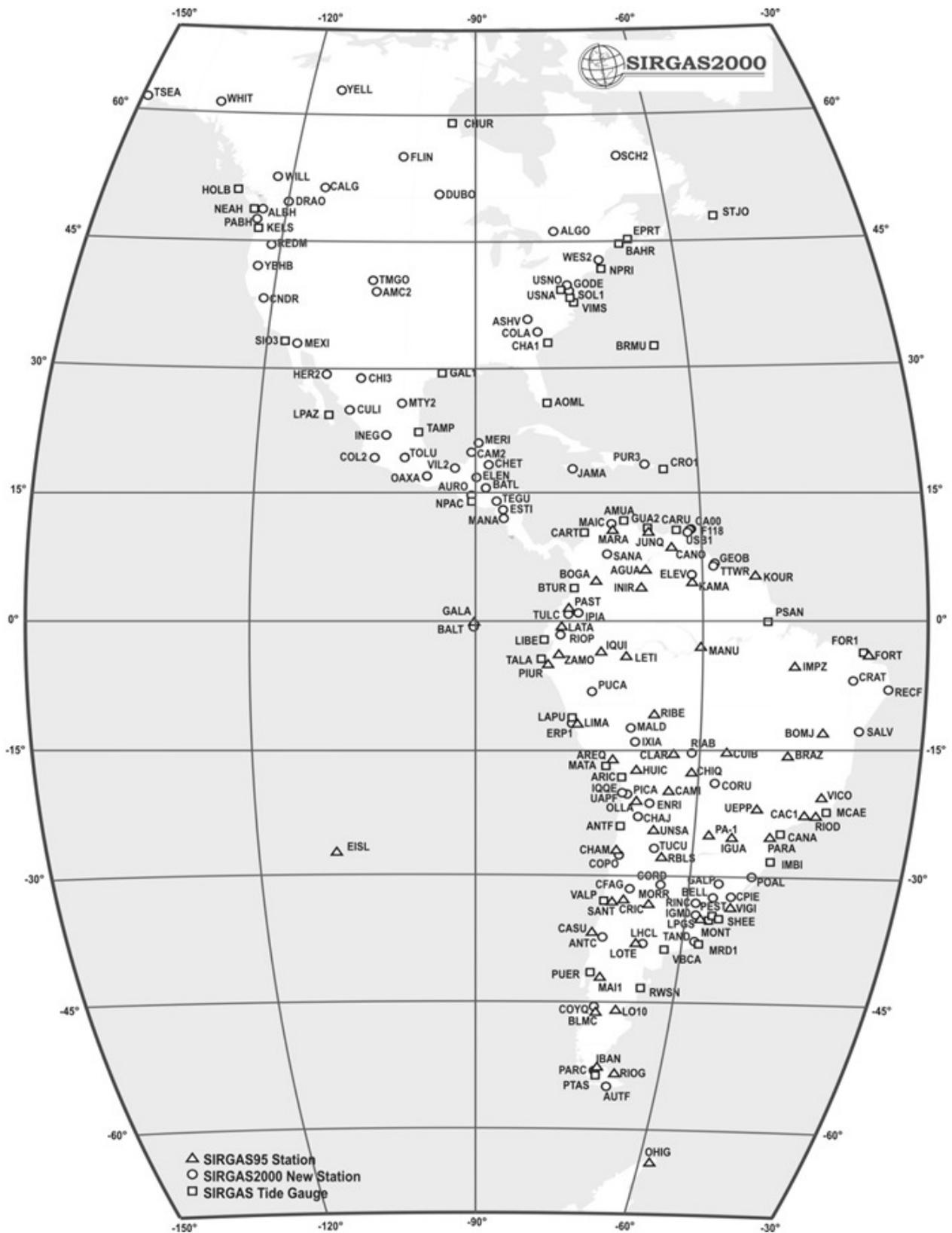


Fig. 3 – Rede de Referência do SIRGAS [Fonte: www.sirgas.org].

5. REFERENCIAL CELESTE

A origem e os eixos de um referencial, em particular o RC, não podem ser materializados de forma direta. Eles são definidos e por convenção é

necessário escolher uma estrutura física que sirva de base para a sua materialização. Durante os anos de 1962 a 1983 utilizou-se o conjunto de 1.535 estrelas do catálogo FK4, cujas coordenadas uranográficas, ascensão reta e declinação, eram

conhecidas. Este sistema completava-se com os valores de precessão e da obliquidade da eclíptica de Newcomb, além da teoria da nutação de Woollard (SEEBER, 1993).

A partir de 1983, o *Astronomisches Rechen Institut* compilou um novo catálogo, o FK5. Resultado da comparação de 100 novos catálogos com o FK4, o FK5 permitiu melhorar os movimentos próprios individuais das estrelas de um fator dois. O sistema usou os valores convencionais de precessão IAU 1976, uma nova determinação do equinócio, do equador e da rotação do padrão local de repouso (KOVALEVSKY *et al.*, 1989). Esta última inovação introduziu o sistema parcialmente cinemático e não puramente dinâmico. A precisão média atingida no FK5 foi de $\pm 0,02''$ em posição e $\pm 0,8\text{mas}$ (milharcosegundo) por ano no movimento próprio. As coordenadas dos catálogos estão referidas, por convenção, à época J2000, que corresponde à época juliana em 1 de janeiro de 2000, 12hs TDB (Tempo Dinâmico Baricêntrico) (TORGE, 2001, Sub-seção 2.2.2). O calendário Juliano foi estabelecido pelo imperador romano Júlio Cesar e tem como origem o ano 4713 a.C., constituindo uma contagem contínua de dias. O ano Juliano tem a mesma duração do ano civil, 365,25 dias solares médios. Assim, a chamada época J2000, 1º de janeiro de 2000, corresponde a 2.451.545,0 dias Julianos.

Em 1991, nas recomendações sobre Sistemas de Referência, a IAU optou por objetos extragalácticos distantes, em substituição às estrelas, que definissem de forma adequada um referencial celeste e adotou direções que fossem fixas em relação a um conjunto selecionado destes objetos (GONTIER *et al.*, 1997). De conformidade com esta recomendação, o ICRS (*International Celestial Reference System*) é realizado pelo ICRF (*International Celestial Reference Frame*) através de um catálogo de coordenadas equatoriais (uranográficas), ascensão reta e declinação, de objetos extragalácticos. As coordenadas são obtidas a partir de observações VLBI, relativas ao equador médio em J2000 (IERS, 2003, McCARTHY, 1996). Uma vantagem fundamental dos objetos extragalácticos é que suas distâncias são tão grandes (~ 10 bilhões de anos/luz) que seus movimentos próprios são indetectáveis, mesmo com as técnicas atuais mais precisas, contrariamente ao que ocorre com as estrelas, o que garante uma

estabilidade rotacional ao referencial. Além disso, ainda devido à distância que os separa da Terra, as paralaxes diurna e anual também são imperceptíveis. Mesmo a paralaxe oriunda de uma suposta observação a partir do centro de massa da Terra ou do baricentro do sistema solar é desprezível. Daí afirmar-se que, dentro do conceito da relatividade geral, a origem do ICRS é o baricentro do sistema solar. Esta característica permite assegurar que, para todos os efeitos, o ICRS é um sistema inercial. Na transformação entre os referenciais celeste e terrestre não há necessidade de considerar a referida translação entre as origens, uma vez que o interesse exclusivo é pela orientação dos eixos. Os objetos referidos acima são conhecidos como quasares, abreviação da expressão em inglês *Quasi-Stellar Radio Source* (Quasars). A precisão típica na posição dos quasares é de $\pm 0,35\text{mas}$ em ascensão reta e $\pm 0,40\text{mas}$ em declinação.

A nova escolha de objetos extragalácticos para a realização de direções fiduciais foi possível graças à técnica altamente precisa de observação VLBI. Trata-se de uma técnica geométrica que mede precisamente direções no espaço e a distância entre as antenas na superfície. Usando um par de antenas, que podem estar separadas por até milhares de quilômetros, a diferença no tempo de chegada às duas estações de sinais de alta frequência emitidos por fontes estelares é medida com precisão de poucos pico-segundos (a luz percorre 1 mm em 3 pico-segundos). O atraso no tempo e sua derivada primeira são reconstituídos por correlação dos sinais gravados nas duas estações. Uma questão fundamental no VLBI é o relógio que serve para datar os eventos. Ele utiliza um padrão de frequência constituído pelo maser de hidrogênio, que tem estabilidade de 10^{-14} em 1.000 segundos (GONTIER *et al.*, 1997). As bandas de frequência usadas nas aplicações geodésicas do VLBI são S e X, com frequência de 2,3 e 8,4GHz e comprimentos de onda de 13cm e 3,6cm, respectivamente.

Em função da evolução descrita nessa seção, conclui-se que a escolha da estrutura física é um tanto arbitrária, o que leva a qualificar os referenciais de “convencionais”.

Quando da escolha dos novos objetos fiduciais, os quasares, a IAU introduziu explicitamente a teoria da Relatividade Geral como fundamento para todos os problemas teóricos e de análise de observações relacionados ao tempo e

ao espaço. De acordo com as novas regras, as direções fundamentais do RC permanecerão fixas no espaço e ainda serão independentes do modelamento do movimento dos objetos do sistema solar. Os objetos serão monitorados e suas posições eventualmente re-estimadas de acordo com a qualidade e a disponibilidade de informações, mas a direção dos eixos coordenados será mantida para consistência com o FK5 (GONTIER *et al.*, 2006). A origem é o baricentro do sistema solar e o plano primário é próximo ao equador médio em J2000 (ARIAS *et al.*, 1995; McCARTHY, 1996). Enfatize-se que o plano primário do sistema IERS é vinculado à precessão convencional IAU 1976 e à teoria da nutação IAU 1980. Sabe-se hoje que estes modelos estão errados em vários milíarcosegundos, exigindo, portanto, o uso de modelos de nutação e precessão mais acurados para definir o equador médio em J2000 relativo ao sistema IERS. Este fato é levado em consideração nas novas convenções da IAU2000 (IERS, 2004). Finalmente, a origem da ascensão reta deve ser próxima do equinócio dinâmico em J2000, consistente com o valor convencional do FK5 (12h 29m 6,6997s em J2000) (ARIAS *et al.*, 1995). Estas e outras especificações compõem as recomendações do Grupo de Trabalho sobre Sistemas de Referência, pesquisadas durante vários anos e adotadas pela IAU em 1997 (KOVALEVSKY *et al.*, 1997). Com isso ficou definido, por convenção, o Sistema de Referência Celeste do IERS, o ICRS, tendo as seguintes características:

- a origem está no baricentro do sistema solar;
- o eixo OX_1 é orientado segundo o equinócio vernal do equador médio J2000;
- o eixo OX_3 orientado para o polo convencional das efemérides na época J2000, o CEP (*Celestial Ephemeris Pole*);
- o eixo OX_2 completando um sistema dextrógiro;

Portanto, direções consistentes com aquelas do FK5.

Como exemplo importante de aplicação, as efemérides precisas dos satélites GPS (*Global Positioning System*) são calculadas no referencial celeste. Isto acarreta uma melhor solução das acelerações dos satélites, uma vez que não há aceleração no referencial.

6. REFERENCIAL TERRESTRE

O Sistema de Referência Terrestre do IERS, o ITRS (*International Terrestrial Reference System*), é definido conforme os critérios estabelecidos pela própria instituição, sendo fixo na Terra. Trata-se de um sistema geocêntrico, isto é, origem no centro de massa da Terra, o que inclui a parte sólida, a líquida (oceanos - hidrosfera) e a gasosa (atmosfera). A referida origem foi melhor caracterizada recentemente através das técnicas SLR (*Satellite Laser Range*) e LLR (*Lunar Laser Range*). A orientação dos eixos foi estabelecida **convencionalmente** em 1984 pelo BIH e é mantida pelo IERS dentro de ± 3 mas (IERS 1997, pg. II-3). Durante muito tempo o eixo OY_3 do RT foi orientado segundo a posição média do polo no período 1900 – 1905, na época chamado CIO (*Conventional International Origin*). Após a introdução da nova orientação, em 1984, o que foi possível com a melhoria do modelo de nutação, o mesmo passou a ser denominado IERS *Reference Pole* e representado pela sigla IRP. Ainda consistente com o sistema BIH 1984, o eixo OX_1 é orientado segundo o IERS *Reference Meridian* (IRM). O eixo OX_2 , a 90° de OX_1 , completa um sistema dextrógiro. O ITRS acompanha o movimento diário de rotação da Terra e foi formalmente adotado pela IUGG em sua XXIV^a Assembleia Geral, em Perugia, 2007, através da Resolução 2, sob a sigla GTRS (*Geocentric Terrestrial Reference System*). Com isso, as coordenadas de pontos sobre a superfície da Terra variam pouco com o tempo, exceção aos movimentos geodinâmicos (movimentos das placas litosféricas) e de marés.

A materialização do Sistema de Referência Terrestre Internacional é uma das atribuições do IERS, como já mencionado. O sistema é usado tanto para analisar conjuntos individuais de uma das técnicas disponíveis atualmente (VLBI, SLR, LLR, GPS, DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*), PRARE (*Precise Range And Range-Rate Experiment*)) ou a combinação de observações das mesmas visando um conjunto único de informações (coordenadas de estações, parâmetros de orientação, UT1, velocidade dos pontos). O ITRS satisfaz aos seguintes critérios (McCARTHY, 1996), numa tentativa de adequar a materialização à definição:

- é geocêntrico, sendo o centro de massa definido para a Terra total o que inclui também os oceanos e a atmosfera;

- sua escala é compatível com um catálogo local de coordenadas terrestres, no sentido relativístico da teoria da gravitação;

- sua orientação é aquela definida inicialmente pelo BIH em 1984;

- a evolução da orientação da rede no tempo é garantida pela condição de “não rotação residual da rede” (*no-net-rotation* - NNR) com relação aos movimentos tectônicos sobre a Terra, considerada globalmente.

Em resumo, a origem do ITRS é determinada pelas tecnologias espaciais, tais como LLR, SLR, GNSS, DORIS, que estão vinculadas a corpos que se movimentam ao redor do centro de massa. Na verdade, as observações oriundas das referidas tecnologias têm suas limitações e imperfeições. Por outro lado, há questionamentos sobre as redistribuições de massa na Terra, o que levanta dúvidas sobre a real posição do centro de massa obtida a partir das observações espaciais. Isto levou a considerar a ideia de que a origem do referencial pode não ter uma perfeita consistência com o centro de massa e, por isso, é denominado de geocentro. A escala depende de algum parâmetro físico, por exemplo, a constante geogravitacional (GM) ou a velocidade da luz (c). A orientação, que não pode ser observada por nenhuma técnica das tecnologias enunciadas, foi estabelecida convencionalmente e não é possível determinar qualquer variação da mesma com o tempo. Assim, recomendou-se definir a evolução da orientação no tempo através da chamada condição de não rotação da rede (NNR – *no-net-rotation condition*) com respeito a movimentos horizontais tectônicos sobre toda a superfície da Terra, alinhando a orientação da rede aos modelos geológicos que descrevem as rotações das placas litosféricas, como o modelo NNR-Nuvel-1A (IERS, 2004) e o APKIM (DGFI, 2007).

A adoção destes critérios não deixa de ser convencional o que torna comum a denominação CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System*) sendo mais comum a sigla ITRS. O sistema terrestre é materializado atualmente através de um conjunto de estações, cujas coordenadas e velocidades são referidas a uma determinada versão, a qual possui uma época associada. Tais coordenadas e suas respectivas derivadas em

relação ao tempo (as velocidades) são normalmente divulgadas na forma cartesiana (X_1, X_2, X_3). Quando do uso de coordenadas geodésicas ou elipsóidicas é recomendado o elipsoide GRS80, cujos parâmetros são:

$$a = 6.378.137,0 \text{ m} \quad (\text{semi-eixo maior})$$

$$e^2 = 0,00669438003 \quad (\text{quadrado da excentricidade})$$

Em suma, o CTRS estabelecido pelo IERS é conhecido pela sigla ITRS (*IERS Terrestrial Reference System*) e é especificado pela resolução nº 2 da IUGG adotada na XXª Assembleia Geral em 1991, Viena.

No início da era espacial a primeira tecnologia disponível para o rastreamento dos satélites foi o método fotográfico. As observações conduzidas sobre os satélites levavam a determinar a direção do satélite no espaço. O advento da tecnologia eletrônica com o sistema que aplicava o efeito Doppler/Fizeau denominado NNSS (*Navy Navigation Satellite System*) ou TRANSIT, resultou na necessidade de posicionar o satélite num referencial cartesiano. Buscou-se definir um referencial, o que significou escolher uma origem e uma orientação, e em seguida materializá-lo. Surgiram referenciais conhecidos pelas siglas WGS72 (*World Geodetic System 1972*), NSWC-9z2 (*Naval Weapons Surface Center*), NWL-9D (*Naval Weapons Laboratory*), entre outros, que visavam posicionar o satélite, mas que reciprocamente permitiam posicionar o observador, num referencial que ‘imperfeitamente’ se dizia ser geocêntrico. Com o desenvolvimento do sistema LASER aos satélites (SLR) e à Lua (LLR) e mais tarde o GPS evoluiu-se na materialização de um referencial cartesiano, surgindo o WGS84, que se imaginou materializar o conceito de um referencial geocêntrico com mais rigor, entendendo-se ainda que o geocentro fosse o centro de massa da Terra. A existência do sistema GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), do DORIS, a perspectiva do GALILEO e de outros sistemas de posicionamento por satélite levou a generalizar a tecnologia sob a sigla GNSS (*Global Navigation Satellite System*). A atenção tem sido sempre voltada para a necessidade de aperfeiçoar a materialização do referencial. Dentro desta

preocupação a Associação Internacional de Geodesia (AIG) criou um serviço, denominado IGS, o qual possui várias atribuições, dentre as quais se destacam o cálculo preciso das órbitas dos satélites GPS e GLONASS e as coordenadas das estações que materializam a rede IGS (Seção 4).

7. MATERIALIZAÇÕES DO ITRS E VARIAÇÕES DAS COORDENADAS

Como foi enfatizado na Seção 4, uma vez definido, o sistema ITRS precisa ser materializado. Desde 1988, quando foi estabelecido o IERS, houve a preocupação na definição do ITRS e Na sua materialização. Ao longo dos anos o IERS vem trabalhando no processo de refinamento da materialização do ITRS através das suas diversas versões. Em sua materialização são usados dados de diferentes tecnologias espaciais de posicionamento, dentre as quais destaca-se o SLR, LLR, VLBI, DORIS e GPS. As soluções através do Método dos Mínimos Quadrados trazem inúmeras dificuldades em função da necessidade de tratar diferentes tipos de observações das tecnologias mencionadas e de equacionar as injunções necessárias e possíveis, bem como os pesos. Um estudo a este respeito pode ser encontrado em (MONICO, 2006). Visando o estabelecimento do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), a IAG criou quatro serviços: o primeiro envolvendo o VLBI, conhecido pela sigla IVS (*International VLBI Service*); o segundo é relativo ao Laser, ILRS (*International Laser Ranging Service*), em seguida vem o IGS (*International GNSS Service*) vinculado ao GNSS; finalmente o IDS (*International DORIS Service*), vinculado ao sistema francês DORIS. Ressalta-se que o IGS vem trabalhando ao longo dos anos na materialização de uma rede global formada somente por estações GPS e GLONASS e na coordenação do grande esforço de várias instituições internacionais na obtenção de soluções cada vez mais refinadas da Rede IGS.

As materializações do ITRS são produzidas pelo IERS sob a sigla ITRFyy, sendo yy os dois últimos dígitos do último ano em que as observações contribuíram na realização em apreço (não são somente observações de um ano que entram na solução). Por exemplo, ITRF94 designa a realização construída em 1995 usando todas as observações levadas a efeito até o final de 1994. A partir do ano

2000 decidiu-se identificar pelos quatro dígitos do ano, e.g., BOUCHER *et al.* (2004) descreve os resultados do ITRF2000. As diversas versões do ITRF são atualizadas regularmente, tendo iniciado com o ITRF88 e sendo a mais recente o ITRF2008. São onze versões ao longo dos anos em que foram sendo melhoradas as estratégias aplicadas no seu cálculo, bem como a inclusão de novas observações das diferentes tecnologias que contribuem com estas materializações. Nas diversas realizações do ITRF, o IERS publica as coordenadas das estações, as suas variações no tempo (velocidades), bem como os parâmetros de orientação da Terra. Também é necessário estimar os parâmetros de transformação entre as diversas realizações, possibilitando assim o relacionamento entre elas. Na materialização do ITRF2008 foram utilizadas 934 estações, a maioria localizada no hemisfério norte, conforme pode ser visualizado na Figura 4 (ALTAMIMI *et al.*, 2011). A origem do ITRF2008 foi definida pela média da série temporal das observações SLR, de tal modo que não possui translações com relação ao centro de massa médio da Terra. A sua escala é definida anulando-se o fator de escala com relação à média das soluções das séries temporais do VLBI e SLR. A orientação (e a sua variação) do ITRF2008 na época 2005.0 foi 'ajustada' ao ITRF2005 usando 179 estações de alta qualidade geodésica.

A compatibilização das diferentes realizações é feita usando a transformação de similaridade através de 14 parâmetros: três translações, três rotações, a escala e as suas variações no tempo. Em http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php são apresentados os parâmetros de transformação para 10 realizações do ITRF, bem como para o WGS84.

A escala do ITRS é obtida através de um modelamento relativista adequado. Especificamente, conforme resoluções da IAU e da IUGG de 1991 e 2007, a escala é consistente com o TCG (Coordenada Temporal Geocêntrica). Em relação à origem, somente observações que incluam técnicas dinâmicas (SLR, LLR, GPS, DORIS) permitem determinar o geocentro (centro de massa). O VLBI garante a orientação do sistema celeste e contribui com a escala do ITRS; este só pode ser referido à origem através das coordenadas obtidas para uma estação numa dada época através de técnicas externas ao mesmo.

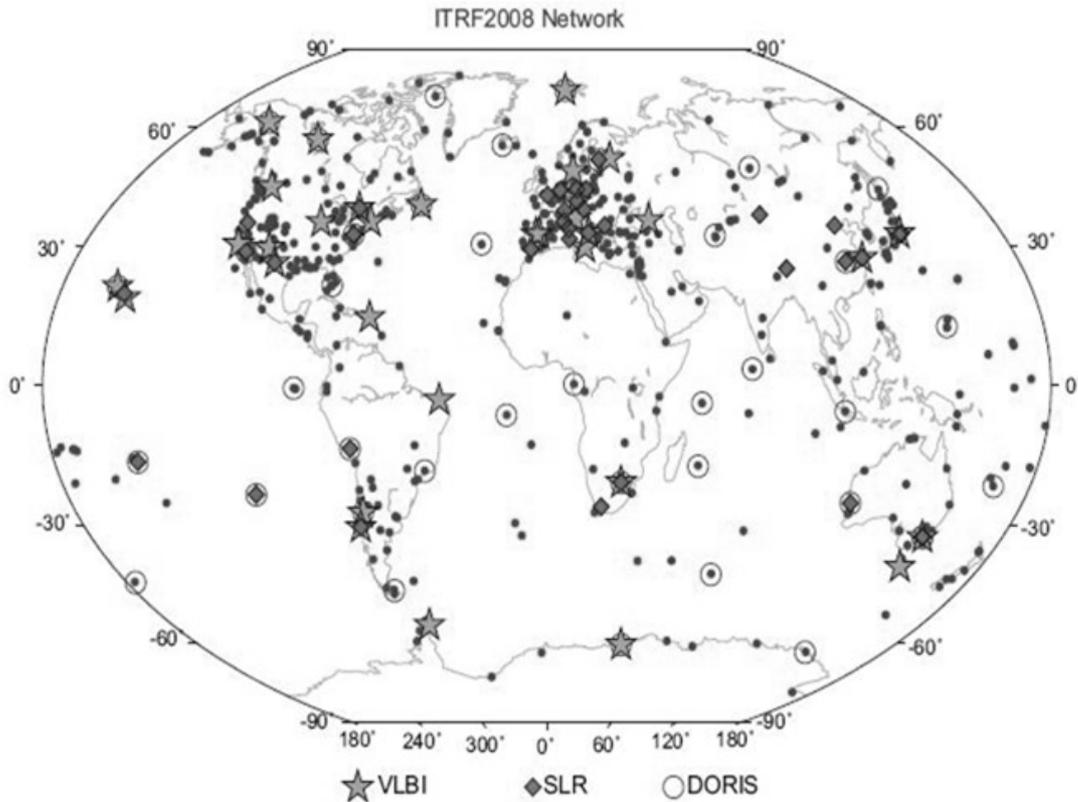


Fig. 4 – Rede de Referência ITRF2008 [Fonte: ALTAMIMI, 2011].

O Polo e o Meridiano de Referência, respectivamente IRP e IRM, são consistentes com as correspondentes direções no Sistema Terrestre BIH (BTS) dentro de 0,005". O Polo de Referência do BIH foi ajustado ao CIO em 1967. A incerteza do IRP em relação ao CIO é de $\pm 0,03$ ". A evolução da orientação no tempo, como já mencionado, é assegurada através da chamada condição NNR.

Por outro lado, as variações das coordenadas das estações no tempo são o resultado dos movimentos tectônicos que acarretam deslocamento dos pontos na crosta terrestre, conseqüentemente acarretando mudanças nas coordenadas. Enfatizando o que já foi mencionado, admite-se a condição NNR, portanto, não há rotação de uma época para a outra. Assim, a posição de um ponto sobre a superfície da Terra, para distintas épocas, deve ser expressa na forma:

$$\bar{X}(t) = \bar{X}_o + \bar{V}_o(t - t_o) + \sum_i \Delta\bar{X}_i(t) \quad (1)$$

onde $\Delta\bar{X}_i$ são correções devido aos vários efeitos de variação com o tempo e \bar{X}_o e \bar{V}_o são a posição e a velocidade da época inicial t_o . As

correções incluem o deslocamento de maré da Terra sólida, a carga do oceano, a carga pós-glacial e a carga da atmosfera. As coordenadas são dadas num referencial convencional onde os efeitos de todas as marés são removidos (McCARTHY, 1996). No processamento das observações levadas a efeito nos vários anos \bar{X}_o e \bar{V}_o devem entrar como incógnitas. Em particular, quando da ocorrência de um evento não linear (terremoto, evento vulcânico, etc.) um novo \bar{X}_o é adotado.

Finalmente, algumas considerações devem ser enfatizadas. O ITRS, tal como caracterizado pelo IERS, é adotado por definição e não deixa de ser uma convenção. A partir da definição é necessário materializá-lo, o que não pode ser feito de forma direta. Na prática, o sistema é materializado através das coordenadas de um conjunto de estações, por exemplo, a rede IGS, as quais são obtidas por uma das tecnologias espaciais ou por uma combinação de várias delas, isto quando há tecnologias colocadas (instaladas em um mesmo local). Tomam-se os cuidados necessários para que as coordenadas estejam perfeitamente referidas ao ITRS. Na realidade, as coordenadas são obtidas a partir de

observações, que têm sua margem de erro, e de modelos que levam em consideração fenômenos da crosta, e que também apresentam suas limitações. Por outro lado, ao longo dos anos vêm se estimando as coordenadas das estações periodicamente. É o que constitui atualmente o ITRFyyyy. Nas diversas materializações (realizações) do ITRS, cada uma se propõe a ser a melhor aproximação possível. A comparação das coordenadas das diferentes realizações resulta em parâmetros de transformação de Helmert. Na divulgação é sempre caracterizada a realização específica para a qual valem os parâmetros. Em resumo, os parâmetros administram o problema das diferenças entre as realizações.

Em resumo, há dois aspectos a cuidar na transformação. Exemplificando, quando se tem as coordenadas de uma estação referida a uma determinada realização, como o ITRF2008, e se deseja obter as coordenadas da mesma referidas ao ITRF97, aplica-se os respectivos parâmetros de transformação. Porém, se o objetivo for conhecer as coordenadas da estação onde ela estava em 1997 no ITRF2000, é preciso levar em consideração a velocidade de deslocamento, o que é muitas vezes é denominado de transformação completa de Helmert. A América do Sul decidiu adotar como referencial comum o SIRGAS2000, uma densificação do ITRF2000 no continente americano. A época adotada no Brasil é 2000,4.

8. VINCULAÇÃO ENTRE O TRS E CRS

A vinculação entre os sistemas celeste e terrestre é feita através dos parâmetros de orientação da Terra - EOP. Estes parâmetros descrevem a orientação de um dado referencial terrestre, em função do tempo, em relação a um referencial celeste. Consistem em cinco componentes: x, y são as coordenadas do CEP (Polo Celeste das Efemérides) relativamente ao polo do referencial terrestre (IRP); dy , de são as diferenças em longitude e em obliquidade respectivamente, do polo celeste em relação à direção estabelecida no referencial celeste pelos modelos convencionais de precessão/nutação da IAU; tempo universal (UT1), que está vinculado ao Tempo Sideral Médio de Greenwich, permite o acesso ao ângulo de rotação do referencial terrestre relativamente ao referencial celeste, ambos materializados, contado ao redor do eixo do CEP. É expresso pela diferença UT1 – TAI, sendo este último o Tempo Atômico Internacional.

O relacionamento entre os referenciais celeste e terrestre é esquematizado na Figura 5.

A Terra não tem uma distribuição homogênea de massa, sendo a principal heterogeneidade a protuberância equatorial. Além disso, a Terra tem partes muito viscosas e líquidas, como os oceanos, e partes menos viscosas, como o núcleo externo. Há também a atmosfera, que é gasosa e que resulta em processos de interação entre as partes líquida, sólida e gasosa. Há necessidade de se monitorar as deformações e deslocamentos da parte sólida e as variações da parte líquida (nível do mar, camadas de gelo, etc.). Por outro lado, quando se considera o sistema solar, todos os corpos giram entorno do baricentro do sistema; mas este na prática coincide com o centro de massa do Sol, uma vez que a massa do mesmo é predominante no sistema. O sistema Terra-Lua é mais simples do que o sistema solar, porém, com uma característica específica. A massa da Terra não é predominante e o centro de massa do sistema está em um ponto distante do centro de massa da Terra de aproximadamente $2/3$ do raio. Ou seja, pode-se dizer que os planetas giram entorno do centro de massa do Sol; mas, no caso do sistema Terra-Lua, os astros envolvidos giram entorno do baricentro do sistema. Por outro lado, este sistema gira entorno do centro de massa do Sol. O fato tem consequência na consideração da força de maré. Finalmente, a Terra experimenta deslocamentos de massa como o movimento (tectônica) das placas litosféricas (intra-placa e inter-placa), a variação do nível do mar função do aumento da temperatura média (expansão térmica) e do derretimento das geleiras e das calotas polares. Isto tudo faz com que a Terra seja um corpo girando no espaço com diversas oscilações, livres e forçadas. O resultado é um eixo de rotação sempre em movimento ao longo do tempo. Em consequência, a transformação entre o referencial celeste, fixo no espaço, e o referencial terrestre, fixo na Terra, passa a não ser algo trivial.

Em suma, considerando um eixo (imaginário) de rotação, ao observá-lo constata-se oscilações do mesmo no espaço, traduzidos por 4 movimentos principais: a precessão geral (a combinação da atração luni-solar e planetária, sendo de longo período); a nutação (pode ser considerada como uma correção de primeira ordem à precessão e tem período de dezenas de anos); o movimento do pólo (período mais curto); e a deriva para oeste. Numa

tentativa de explicação simples desses dois últimos movimentos; pode-se pensar numa situação em que uma pessoa se fixasse no espaço e passasse a observar continuamente o pólo a partir de um instante. Após horas de observação verificaria um pequeno movimento do ponto. Persistindo um pouco mais na observação (vários dias) o movimento continuaria de uma forma aparentemente irregular. Mantendo-se a observação por alguns anos notar-se-ia uma tendência de um movimento em círculo, porém, irregular. É o que se conhece por “movimento do pólo” representado na Figura 6 pela linha tracejada (a polódia). Porém, olhando para este movimento num período maior (vários anos) a constatação vai além e notar-se-ia uma deriva para oeste representada pela linha de círculos na Figura 6. No contexto destes dois movimentos convencionou-se escolher um ponto num dado momento e adotá-lo como orientação do Sistema de Referência Terrestre, o CIP (*Conventional International Pole*). Indo além e estendendo a observação ao polo por dezenas de anos ficaria clara a existência de um movimento mais lento, a nutação, com um período de 18,6 anos (Figura 7). Se hipoteticamente o observador ficasse milhares de anos observando ainda comprovaria a existência da precessão (período de 25.600 anos). Uma certa posição do pólo, considerando estes dois movimentos de períodos mais longos, foi convencionalmente adotado como orientação do eixo Z do sistema celeste e denominado CEO (*Celestial Ephemeris Origin*), ver IERS 2010.

Os diferentes fenômenos fazem com que o eixo de rotação terrestre não coincida com o eixo de inércia. O resultado é o movimento do eixo de rotação entorno do eixo da eclíptica. Assim, os referenciais terrestre e celeste se vinculam entre si através dos parâmetros de orientação da Terra, que descrevem os movimentos do eixo de rotação em relação ao eixo da eclíptica, em associação com os modelos de precessão (componente secular) e de nutação (componente periódica) (Figura 7). A expressão de transformação para uma data t é a seguinte:

$$\vec{X}^C = Q(t)R(t)W(t)\vec{X}^T \quad (2)$$

sendo Q, R e W as matrizes de transformação oriundas do movimento do polo celeste no sistema celeste (precessão e nutação), da rotação da Terra

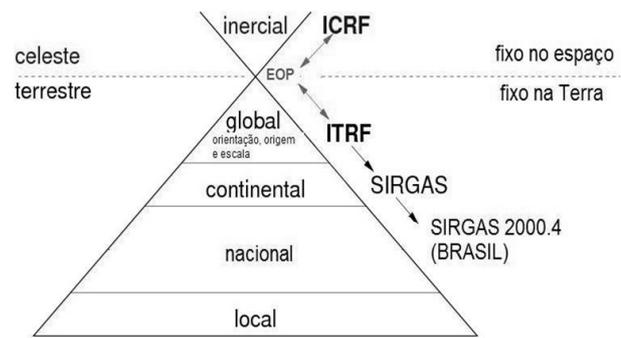


Fig. 5 – Relacionamento entre os referenciais celeste e terrestre através do EOP.

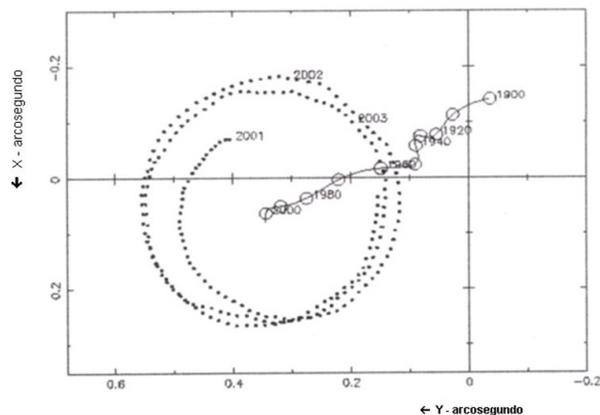


Fig. 6 – Movimentos do eixo de rotação: polódia e deriva para oeste. Fonte: IERS TN, n.º 31

ao redor do eixo do polo, e do movimento do polo respectivamente. As matrizes de precessão e de nutação são definidas através dos modelos estabelecidos pela IAU em 1976 e em 1980 respectivamente (IERS, 1992), recentemente corrigidos pelo IERS através de observações VLBI.

Os sistemas de referência e os procedimentos inerentes a eles, a cargo do IERS, estão baseados em resoluções aprovadas e recomendadas por uniões internacionais. Assim, o sistema celeste segue a Resolução A4 da IAU de 1991. O sistema foi oficialmente iniciado e implantado pela Resolução B2 da IAU em 1997 e sua definição foi objeto de um refinamento através da Resolução B1 da IAU em 2000. O sistema terrestre se baseia na Resolução 2 da XXIVª Assembléia Geral da IUGG, conforme mencionado anteriormente. Já a transformação entre os sistemas celeste e terrestre é fundamentada pela Resolução B1 da IAU em 2000. (IERS, 2004), (MONICO, 2004). Deve-se observar que para

definir a posição de um ente ou um evento no espaço usa-se uma coordenada na forma mais apropriada para um determinado fim, como por exemplo a forma de representação cartesiana, elipsóidica ou curvilínea (geodésica) ou plana (projeção UTM). Para se posicionar o evento no tempo a coordenada apropriada é a temporal (de tempo). Neste caso igualmente há mais de uma possibilidade de escolha da coordenada temporal dependendo de um caráter relativista da origem. Por exemplo, pode-se referir ao geocentro ou ao baricentro do sistema solar. Neste aspecto, diz-se tratar-se de uma coordenada temporal geocêntrica - TCB (*Geocentric Coordinate Time*) ou uma coordenada temporal baricêntrica - TCB (*Baricentric Coordinate Time*). (Obs.: Há certo vício em confundir o entendimento com o TUC (Tempo Universal Coordenado) que não deixa de ser igualmente uma coordenada temporal, mas por ser estabelecida por um órgão internacional (BIH) passou a ser entendido como um tempo coordenado. No caso do TCG e do TCB não se trata de um tempo coordenado, mas de uma coordenada temporal (de tempo).

9. MODELO GEOPOTENCIAL

Os modelos recentes do geopotencial apresentam significativas melhorias com relação ao modelo EGM96, adotado nas Convenções de 2003 do IERS (IERS, 2004), graças à disponibilidade na década passada dos dados do CHAMP e principalmente do GRACE.

O IERS, reconhecendo o desenvolvimento recente de novos modelos do geopotencial derivados da combinação de dados do GRACE



Fig. 7 – Movimento de precessão (25.600 a) e de nutação. (SEEBER, 1993)

com informações de gravimetria terrestre e de altimetria por radar, recomenda o EGM2008 como o modelo convencional.

O modelo EGM2008 (PAVLIS *et al.*, 2008) é completo até grau e ordem 2159, em termos dos coeficientes das funções harmônicas esféricas e contém informações adicionais dos até grau 2190 e ordem 2159. Os valores do GM e do eixo maior relacionados com EGM2008 são 398600,4415 km³/s² e 6.378.136,3 m, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Muitas das ideias aqui expostas em relação aos métodos astronômicos foram absorvidas em exposições do Prof. Dr. Ramacrishna Teixeira em diferentes visitas realizadas ao Observatório Astronômico de Valinhos. Além disso, os autores são gratos a ele pela leitura do artigo e pelas sugestões fornecidas. Discussões levadas a efeito, em visita ao DGFI, com o Dr. Hermann Drewes e o Dr. Klaus Kaniuth serviram para aperfeiçoar alguns conceitos. Discussões com o Dr. João Francisco Galera Monico enriqueceram o conteúdo em vários aspectos. Finalmente, importantes sugestões foram incorporadas ao texto após a leitura atenciosa do Prof. Edvaldo Simões da Fonseca Jr.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. **.ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame**, Journal of Geodesy, Volume 85, Number 8, pp. 457-473, 2011.

ARIAS E. F.; CHARLOT P.; FEISSEL M.; LESTRADE J. F. **The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service**, ICRS. Astronomy and Astrophysics, 303, pp. 604-608, 1995.

CAZENAVE, A.; DOMINH, K.; GUINEHUT, S.; BERTHIER, E.; LLOVEL, W.; RAMILLIEN, G.; ABLAIN, M.; LARNICOL, G. **Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo**, Global and Planetary Change, Volume 65, Issues 1-2, pp. 83-88, January 2009.

COPERNICUS N. **De revolutionibus orbium caelestium** (Edward Rosen, Trans.). Baltimore: Johns Hopkins University Press, (Original work published 1543), 374 p., 1992.

- DICKEY, J. **Interdisciplinary Space Geodesy: Challenges in the New Millennium**. Jet Propulsion Laboratory. Internal report. Pasadena, 2001.
- DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) **Annual Report 2006/2007**, 96 pp Munich, 2007.
- GALILEO GALILEI **Istoria e dimostrazione intorno alle macchie solari**. Academia del Lincei. Roma, 1613.
- GEMAEL, C. **Referenciais Cartesianos utilizados em Geodésia**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 76 pp, 1981.
- GONTIER, A. M.; ARIAS, E. F.; BARACHE, C. **Maintenance of the ICRF using the most stable sources**. In: IERS Technical Note 34. Observatoire de Paris, pp. 7-19, 2006.
- GONTIER, A. M.; FEISSEL, M.; MA, C. **The contribution of VLBI to the realization of a Celestial Reference System**. In: IERS Technical Note 23. Observatoire de Paris, No. 23, p. I-3 - I-20, 1997.
- IERS-IUGG-IAU. **IERS: Missions and goals for 2000**. Observatoire de Paris. Paris, 27p, 1995.
- IERS. **1997 IERS Annual Report**. Editors : Gambis, D.. Observatoire de Paris (France). Central Bureau of IERS, VI + 60 + 98 p., ISBN 2-900340-10-1, Jul 1998.
- IERS **IERS Technical Note 13**. Editors : McCarthy D. D., Central Bureau of IERS. Observatoire de Paris, 150p., 1992.
- IERS **IERS Conventions (2003)**. IERS Technical Note, No. 32, Frankfurt am Main, Germany: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, 12p., 2004.
- IERS **IERS Conventions (2010)**. IERS Technical Note, No. 36, Frankfurt am Main, Germany: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, 12p., 2010.
- KOVALEVSKY, J.; MUELLER, I. I.; KOLACZEK, B. **Reference Frames in Astronomy and Geophysics**. IERS Technical Note 23. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers (Astrophysics and Space Science Library. Volume 154), 482 p. , 1989.
- KOVALEVSKY, J.; LINDEGREN, L.; PERRYMAN, M. A. C.; HEMENWAY, P. D.; JOHNSTON, K. J.; KISLYUK, V. S. **The HIPPARCOS catalogue as a realisation of the extragalactic reference system**, Astronomy and Astrophysics 323, pp. 620-633, 1997.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. **Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira**, Revista Brasileira de Cartografia N0 56/01, pp. 14-27, 2004.
- McCARTHY D. D. **IERS conventions (1996)**. IERS Technical Note 21. Observatoire de Paris. Paris, 95 p., 1996.
- MONICO, J. F. G. **FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS ENVOLVIDOS NA REALIZAÇÃO DO ITRS**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Comunicações, Curitiba, v. 12, no 2, p.337-351, jul-dez, 2006.
- MONICO J. F. G. **Transformação entre referenciais celeste e terrestre de acordo com a Resolução IAU 2000**. In: Série em Ciências Geodésicas, vol. 4. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, p. 31-41, 2004.
- OLIVEIRA, L. C. **Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro Associadas ao SAD 69 – Uma Proposta Metodológica de Transformação**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, 197 p, 1998.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Walter de Gruyter, Berlin, 531 p, New York, 1993.
- PAVLIS, N. K., HOLMES, S. A., KENYON, S. C., FACTOR, J. K. **An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008**, presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.
- TORGE, W. **Geodesy**. 3. compl. rev. and ext. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 416 p, 2001.