

6. SIRGAS2000: conquistas e desafios no continente americano – comparativo Brasil e Argentina

*Plínio da Costa Temba
Marcelo Antonio Nero
Cecília Cornero
Sebastián Amherdt*

Introdução

A demanda por uma cartografia moderna e atualizada sempre foi uma cobrança às autoridades e à comunidade técnica pela sociedade de um modo geral. Por outro lado, as limitações das tecnologias que dominavam os empreendimentos responsáveis pela publicação analógica de mapas e os levantamentos de superfície representavam um entrave significativo ao avanço. Somente com o advento de novas tecnologias que permitiram a publicidade na mídia digital e o alcance de atividade de medição com receptores de satélites artificiais, foi possível promover mudanças que sensibilizaram e impactaram a sociedade, seja por meio do acesso a localidades pela telefonia celular, seja

por meio de operações de medição com o uso combinado de celulares a centrais de profusão de dados pelo IBGE ou órgãos assemelhados regulamentados. O capítulo trata de um aspecto que está na gênese destas mudanças: a admissão de um Sistema Geodésico de Referência compatível com a geodésia espacial – compreendendo as virtudes e fragilidades que a acompanham. Revela o alcance que esta mudança traduz em todo o continente americano e os efeitos e contribuições com que cada país pode contribuir. São tratados, em particular, os aspectos significativos no Brasil e na Argentina. Destaca-se, para tanto, a importância do SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, campanha de 2000), que espelha as alterações que impactam o sistema de coordenadas, abstrato naturalmente, que serve para fornecer locais conhecidos para iniciar levantamentos e criar uma cartografia moderna e atualizada como esperado. O capítulo detalha conceitualmente as superfícies de referência – geoide e elipsoide –, a legislação e os efeitos caudatários das transformações que levaram o Brasil a adotar o SIRGAS2000, além das divergências verificadas decorrentes das transformações dos modelos de superfícies remotos em comparação com os adotados atualmente.

Sistema Geodésico de Referência

Dalazoana (2001) conceitua o Sistema Geodésico de Referência (SGR) sob a égide de dois critérios. O primeiro pela *definição*, em que o SGR pode ser caracterizado por um conjunto de convenções junto a um elipsoide ajustado às dimensões da Terra e devidamente orientado; e o segundo pela *realização*, em que

pode ser estabelecido por um conjunto de pontos implantados sobre a superfície física da Terra com coordenadas conhecidas. O IBGE assegura que a materialização se efetiva com as Redes Geodésicas Brasileiras – RGB (planimétrica e altimétrica), formadas pelos conjuntos de estações e coordenadas geodésicas implantadas e homologadas pelo órgão.

Sampaio e Sampaio (2015) elencam os *data* horizontais em escala temporal praticados no Brasil: Córrego Alegre, Astro Datum Chuá, SAD69 e SIRGAS2000. Detalham características do primeiro *datum* no Brasil (o Córrego Alegre).

Para se estabelecer um SGR, na época do primeiro *datum* no Brasil [...], vários ajustes foram necessários, para se definir este sistema. Antes do advento tecnológico da computação, estes ajustes eram feitos com calculadoras mecânicas e com o uso das tábuas de logaritmo. Com essa tecnologia, estabeleceu-se o *Datum* Córrego Alegre de 1949. A escolha do vértice Córrego Alegre para ponto *datum*, bem como [a] do elipsoide internacional de Hayford para superfície matemática de referência, foram baseadas em determinações astronômicas realizadas na implantação da cadeia de triangulação em Santa Catarina (SAMPAIO; SAMPAIO, 2015, p. 1705).

Quanto ao SIRGAS, Figura 1, ele foi concebido na era da geodésia espacial, portanto possui características diferentes dos SGRs relatados anteriormente, mas a sua essência é a mesma no sentido de possuir uma parte definidora, e atrelada a ela uma materialização.

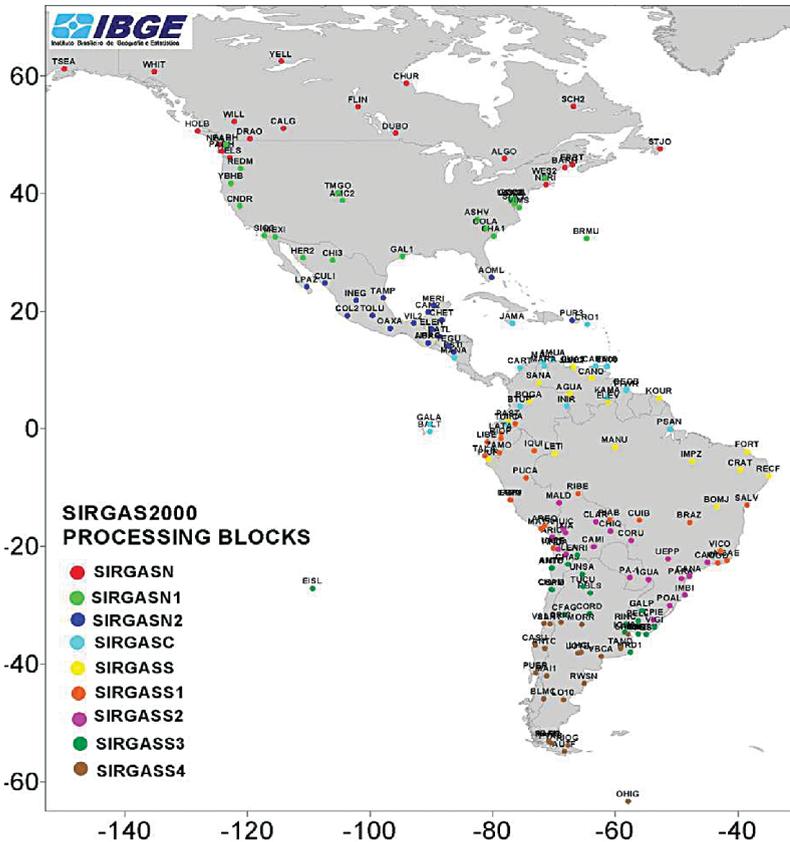


Figura 1 - Distribuição de estações SIRGAS2000 no continente americano
 Fonte: IAG, 2002.

Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS)

O Decreto nº 5.334, de 6 de janeiro de 2005 (BRASIL, 2005), e a Resolução PR nº 01/2005 (IBGE, 2005) alteraram a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro e definiram o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização do ano de 2000 (SIRGAS2000). Suas características são detalhadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Caracterização do SIRGAS2000

Sistema Geodésico de Referência
Sistema Internacional de Referência Terrestre – ITRS (International Terrestrial Reference System)
Figura geométrica para a Terra
Elipsoide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (Geodetic Reference System 1980 – GRS80)
Semieixo maior $a = 6.378.137$ m
Achatamento $f = 1/298,257222101$
Origem
Centro de massa da Terra
Orientação
Polos e meridiano de referência consistentes em $\pm 0,005''$ com as direções definidas pelo BIH (Bureau International de l'Heure), em 1984,0.
Estações de Referência
As 21 estações da rede continental SIRGAS2000, estabelecidas no Brasil e identificadas nas Tabelas ^(*) 1 e 2, constituem a estrutura de referência a partir da qual o sistema SIRGAS2000 é materializado em território nacional. Está incluída nestas tabelas a estação SMAR, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC), cujas coordenadas foram determinadas pelo IBGE posteriormente à campanha GPS SIRGAS2000.
Época de Referência das coordenadas
2000,4
Materialização
Estabelecida por intermédio de todas as estações que compõem a Rede Geodésica Brasileira, implantadas a partir das estações de referência.
Velocidade das estações
Para aplicações científicas, onde altas precisões são requeridas, deve-se utilizar o campo de velocidades disponibilizado para a América do Sul no site http://www.ibge.gov.br/sirgas . Com estas velocidades, é possível atualizar as coordenadas de uma estação da época de referência 2000,4 para qualquer outra, e vice-versa, por conta das variações provocadas pelos deslocamentos da placa tectônica da América do Sul.
^(*) As Tabelas 1 e 2 (que se encontram na fonte consultada) descrevem as coordenadas de 22 estações de Referência SIRGAS2000 situadas no Brasil referidas à época 2000,4. A Tabela 1 expressa a localização das estações em coordenadas cartesianas, enquanto a Tabela 2 em coordenadas geodésicas.

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2005).

O Quadro 2 sintetiza a publicação do sétimo *Boletim Informativo* do SIRGAS, que registra as informações da reunião promovida em Santiago, Chile, em 2002. São relatados os resultados da campanha GPS SIRGAS2000.

Quadro 2 - *Boletim Informativo* nº 7 – Projeto SIRGAS

Realização	
The International Association of Geodesy (IAG), Instituto Panamericano de Geografia e Historia (IPGH) e National Imagery and Mapping Agency (NIMA)	
Resoluções	
O comitê SIRGAS decidiu que a solução final da campanha GPS SIRGAS2000 será gerada pela combinação de três soluções: do DGFI, utilizando-se o software Bernese; do DGFI, utilizando-se o software GIPSY; e do IBGE, utilizando-se o software Bernese.	
Seguir utilizando o modelo livre das marés nos resultados SIRGAS2000 e sugerir formalmente à IAG que gestione junto ao International Earth Rotation Service (IERS) a solução da questão.	
O Comitê SIRGAS aprova a proposta de H. Drewes de se considerar as observações de estações GPS permanentes e das campanhas geodinâmicas, além dos resultados das campanhas SIRGAS1995 e SIRGAS2000, na determinação do campo de velocidades no continente sul-americano.	
Estabelecer um Datum Geocêntrico mediante a extensão da Rede GPS SIRGAS através da integração das “Redes Geodésicas” de cada um dos países sul-americanos participantes no Projeto SIRGAS.	
Integração dos países sul-americanos ao SIRGAS	
Argentina	
Responsáveis	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar
Medições de campo	136 estações da Rede POSGAR 98
	109 pontos em comum com a POSGAR 94
Processamento de dados	Universidad Nacional de la Plata (DGFI)
	Software BERNESE 3.5
Avanços tecnológicos	Recentemente o subcomitê de Geodésia recomendou o uso do novo marco de referência POSGAR 98 para as realizações geodésicas de alta precisão a se desenvolverem no futuro, ainda que mantenha por mais um tempo em vigência o POSGAR 94. POSGAR 98, época 1995,4.
Contribuição ao SIRGAS2000	20 estações

(Continua)

(Continuação)

Bolívia	
Responsáveis	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar
Medições de campo	Existem 2 Redes de controle GPS: - Rede geodésica Fundamental classe A - Rede Mineira classe B
Processamento de dados	Instituto Geográfico Militar
	Software BERNESE 3.5
Contribuição ao SIRGAS2000	9 estações
Equador	
Responsáveis	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar
Medições de campo	135 estações medidas durante 1994, 1996 e 1998
Processamento de dados	Instituto Geográfico Militar
	Em DGFI, Munique, Software BERNESE 4.0
Avanços tecnológicos	Obtenção de coordenadas apoiadas ao SIRGAS, época 1995,4.
Contribuição ao SIRGAS2000	42 pontos em comum entre PSAD56 e SIRGAS para a determinação de parâmetros locais de transformação.
Brasil	
Responsáveis	Sonia Maria Alves Costa – IBGE
Medições de campo	22 estações SIRGAS, 14 são da Rede de Monitoramento Contínuo.
Processamento de dados	IBGE
	Software BERNESE 4.0
Avanços tecnológicos	Em Outubro de 2000 o IBGE organizou e coordenou o primeiro Seminário para visualizar a adoção do novo Marco de Referência Geodésico. No ano de 2005, o Brasil pretende adotar o SIRGAS oficialmente.
	Órbitas e ERP: IGS combinado (arquivos SP3); coordenadas das estações de referência: ITRF97, época 2000,3; desvio e variação do centro de fase da antena: informações obtidas no IGS e NGS; as alturas da antena foram corrigidas para ARP (Antenna Reference Point).
Contribuição ao SIRGAS2000	21 estações

(Continua)

(Continuação)

Chile	
Responsáveis	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar
Medições de campo	260 pontos da Nova Rede Geodésica Nacional e 133 pontos conectados à antiga Rede.
Processamento de dados	Instituto Geográfico Militar
	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar, Software BERNESE 4.0
Avanços tecnológicos	Coordenadas preliminares ITRF 2000, à espera de ajuste final ao SIRGAS2000. Estima-se que em 2005 se adotará oficialmente o SIRGAS em todo o país.
Contribuição ao SIRGAS2000	20 estações, sendo 8 estações GPS de Monitoramento Contínuo e 5 mareógrafos.
Colômbia	
Responsáveis	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Medições de campo	A Red MAGNA consta de 60 estações GPS, das quais 16 correspondem à Rede CASA (Rede Geodinâmica para o Centro e Sul da América).
Processamento de dados	Instituto Geográfico Militar
	G. Agustín Codazzi – DGFI. Software BERNESE 4.0
Avanços tecnológicos	A Rede MAGNA e em consequência o SIRGAS foram adotados como sistema oficial da Colômbia desde 1998. Estão definindo os padrões de geoposicionamento no âmbito nacional, dentro da normativa ISO9001.
Contribuição ao SIRGAS2000	8 estações
Paraguai	
Responsáveis	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar
Medições de campo	165 pontos medidos da Rede Geodésica primária em 1992.
Processamento de dados	Instituto Geográfico Militar
	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar e NIMA
Contribuição ao SIRGAS2000	1 estação

(Continua)

(Continuação)

Peru	
Responsáveis	Departamento de Geodésia do Instituto Geográfico Militar
Medições de campo	165 pontos medidos da Rede Geodésica primária em 1992.
Processamento de dados	Instituto Geográfico Militar e NIMA
Contribuição ao SIRGAS2000	10 estações
Uruguai	
Responsáveis	Serviço Geográfico Nacional e Instituto de Agrimensura
Contribuição ao SIRGAS2000	8 estações
Venezuela	
Responsáveis	Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar
Medições de campo	156 estações entre 1995 e 2000.
Processamento de dados	Software BERNESE
Avanços tecnológicos	A Venezuela possui 210 vértices integrados ao SIRGAS, disponíveis e publicados. Além desses, existem 500 vértices totalmente calculados, em fase de edição de descrições, acessos e monografias. A Venezuela oficialmente adotou o SIRGAS como novo Sistema de Referência.
Contribuição ao SIRGAS2000	10 estações

Fonte: Elaboração própria com base em IAG (2002).

O SIRGAS adota como Sistema Geodésico de Referência o Sistema Internacional de Referência Terrestre (ITRS). Segundo Altamimi (2009) e Altamimi *et al.* (2012), o ITRS é promovido pela Associação Internacional de Geodésia (IAG). Constitui um conjunto de prescrições e convenções, juntamente com a modelagem necessária para definir origem, escala, orientação e evolução temporal de um Sistema Convencional de Referência Terrestre (Conventional Terrestrial Reference System – CTRS). O sistema é realizado pela Rede Geodésica de Referência Internacional

(International Terrestrial Reference Frame – ITRF) com base nas coordenadas e velocidades estimadas de um conjunto de estações observadas pelo Serviço Internacional de Interferometria de Linha-Base Muito Longa (International Very Long Baseline Interferometry Service – VLBI), Serviço Internacional de Medição a Laser (International Laser Ranging Service – ILRS), Medição Lunar a Laser (Lunar Laser Range – LLR), Serviço Internacional do GNSS (International GNSS Service – IGS), Medição do Satélite por Laser (Satellite Laser Ranging – SLR) e Serviço Internacional DORIS (International DORIS Service – IDS). A Resolução PR nº 01/2005 publicada pelo IBGE (2005) contemplou a coexistência entre os sistemas SAD69 e Córrego Alegre, conforme os parâmetros definidos nessa resolução.

Soler e Marshall (2003) apresentaram uma solução para transformar coordenadas e velocidades de quadros do ITRF em sistemas geodésicos geocêntricos modernos baseados na geodésia espacial. Foram contemplados o Datum Norte-Americano (North American Datum of 1983 – NAD83), Sistema Geodésico de Referência Terrestre Europeu (European Terrestrial Reference System 89 – ETRS89), Datum Geodésico da Austrália (Geocentric Datum of Australia 1994 – GDA94) e SIRGAS. Magna Júnior, Carmargo e Galo (2009) desenvolveram posteriormente uma metodologia afinada ao procedimento praticado por Soler e Marshall (2003) para a modelagem de distorções entre realizações dos sistemas geodésicos SAD69 e SIRGAS2000. A proposta de pesquisa gerou grades de distorção com utilização do método de *Shepard*.

Concluíram que a modelagem das distorções entre o SAD69 (realização de 1996) e o SIRGAS2000 obteve valores médios de distorção na grade gerada de -0,247 m em latitude e 0,028 m em longitude, com um indicador médio de precisão de 0,158 m e 0,099 m, respectivamente, em latitude e longitude. Apontam que há assimetria de resultados em determinadas regiões da rede geodésica brasileira que prejudica a aderência da modelagem.

Magna Júnior *et al.* (2014) propuseram a solução para a transformação de coordenadas entre os referenciais SAD69 e SIRGAS2000. O método *Thin-Plate Splines* (TPS) revela uma vantagem em relação ao método *Shepard*, pois contempla, além de medições com características para a modelagem a partir de dados homólogos resultantes de uma transformação geométrica (translação, rotação, não ortogonalidade e fator de escala), outras com distorções de natureza não linear.

A qualidade da modelagem foi verificada nas transformações direta e inversa entre as realizações SAD69 e SIRGAS2000. Os resultados mostraram que o erro máximo esperado para a modelagem com TPS foi de aproximadamente 3,5 mm em latitude e 2,6 mm em longitude.

O estudo sobre a propagação de erros, tratados na literatura também como incertezas ou covariâncias, fora adotado com resultados exitosos para diversas finalidades. Yao *et al.* (2015) desenvolveram modelo de propagação de incertezas para linhas costeiras compiladas a partir de imagens aéreas coordenadas por marés e não coordenadas por marés, usando imagens fotogramétricas. Afirmaram ainda que se poderia facilitar a estimativa da incerteza nos modelos de inundação e migração de pântanos. Seales e Lenardic (2020), também nesse caminho, realizaram tarefas de mesmo teor associadas ao movimento das placas tectônicas.

Aguiar, Oliveira e Galo (2002), por sua vez, propuseram uma metodologia que estima a propagação de covariâncias na transformação de coordenadas e *data*, seja a solução direta ou iterativa. O artigo desses autores revela uma metodologia que permitiu obter a propagação de covariância decorrente da transformação de coordenadas geodésicas cartesianas (X, Y, Z) do Sistema Geodésico de Referência SAD69 ou Córrego Alegre para as coordenadas geodésicas (j, l, h) referidas ao Datum WGS84, que utiliza o Sistema de Referência Geodésico GRS-80 como elipsoide de referência. O WGS84 partilha de parâmetros de determinação

assemelhados aos do SIRGAS2000. Os autores usaram um aplicativo educacional que, além de outras, realiza as transformações entre os sistemas geodésicos Córrego Alegre, SAD69 e WGS84. Foi considerada no processo de cálculo a transformação intermediária para o sistema de projeção TM – Transverso de Mercator. Foram considerados os vetores X e Y (coordenadas geodésicas cartesianas), cujos componentes são variáveis aleatórias e estão associados a um modelo linear na forma:

$$Y = GX + C \quad (1)$$

Y - vetor das quantidades calculadas;

G - matriz dos coeficientes;

X - vetor das observações, com média U_x e $MVCV^* SX$;

C - vetor de constantes;

(*) - matriz variância-covariância.

As equações utilizadas na conversão de coordenadas geodésicas em cartesianas (X, Y, Z) são dadas por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ \left[N(1 - e^2) + h \right] (\sin \varphi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

N - grande normal;

e - excentricidade do elipsoide de referência.

A propagação de covariâncias é expressa por:

$$\Sigma_{xy} = D \Sigma_{\phi\lambda} D^T \quad (3)$$

$\Sigma_{\phi\lambda}$ - matriz variância-covariância das coordenadas geodésicas;

Σ_{xy} - matriz variância-covariância das coordenadas TM.

Evolução dos Sistemas Geodésicos de Referência na Argentina

Antes de iniciar uma discussão mais teórica a respeito da implantação dos Sistemas Geodésicos de Referência na Argentina, vale destacar como foi, de um modo resumido, a história da República Argentina, bem como os aspectos gerais de relevo, o que foi relatado por Mugnier (2017). O autor comenta sobre a descoberta do Rio da Prata em 1516, por Juan Díaz de Solís, sendo que a Argentina teve como marco inicial de exploração de seu território os anos de 1526 a 1530, por Sebastián Cabot. Já em 1536, Pedro e Mendoza fundaram a primeira colônia, denominada Buenos Aires. A Argentina se tornou um país independente da Espanha no ano de 1816, sendo o segundo país em extensão territorial na América do Sul a realizar esse feito.

No que diz respeito a seu relevo, a Argentina possui regiões planas e de planalto, tais como o Chaco (Norte) e os Pampas (área Central), bem como a Cordilheira dos Andes na sua porção principal e a Oeste, na divisa com o Chile. As altitudes variam de 40 a 6.962 metros, esta última se referindo à altitude do Pico do Monte Aconcágua, sendo o mais alto do Hemisfério Ocidental do Mundo.

Mugnier (2017) relata ainda sobre a fundação do Departamento de Topografia da província de Buenos Aires no ano de 1879, sendo criado no final do mesmo ano o denominado Escritório de Topografia Militar e denominado finalmente em 1901 de Instituto Geográfico Militar (IGM), atual Instituto Geográfico Nacional (IGN). O autor relata sobre as várias observações astronômicas realizadas e que foram utilizados para a adoção os sistemas geodésicos locais. Esses mesmos sistemas serão abordados com mais detalhe na seção seguinte.

Mugnier (2017) menciona que antes do advento do GPS, quando não existiam ainda os sistemas de posicionamento globais, a

Argentina adotou vários sistemas locais e topocêntricos, o que aconteceu e foi aplicado para as diversas regiões do país, tais como em Castelli, Iglesia Flores, Chos Malal, Quiñi Huao, Aguarray, Pampa del Castillo, entre outras. Porém, no ano de 1940, todos esses sistemas foram integrados e convertidos num único *datum* horizontal, denominado Sistema Geodésico Inchauspe (detalhado mais adiante), o qual era topocêntrico (origem do sistema medida em vértice obtido por técnicas astronômicas e convertidas para coordenadas geodésicas), sendo que mais recentemente se adotou o sistema geocêntrico (origem do sistema corresponde ao centro de massas da Terra), a partir do conceito de Sistema de Posicionamento Global, no início da década de 1990. Esse novo conceito é apresentado mais à frente, na seção destinada ao POSGAR (Posições Geodésicas Argentinas).

Sistemas Geodésicos de Referência locais na Argentina

O IGN (2017) informa que na Argentina, antes do advento de práticas da geodésia espacial, a determinação das coordenadas se realizava a partir da definição de um sistema geodésico local (ou seja, definia-se um ponto de origem com coordenadas geográficas de latitude e longitude do elipsoide de referência) e posterior materialização por meio das redes de triangulação. Estas redes foram obtidas a partir de medições angulares, medições de distância e medições astronômicas, com o uso de equipamentos geodésicos e topográficos clássicos (por exemplo, teodolitos, trenas e outros). Assim, desenvolveram-se vários sistemas geodésicos locais com *data* topocêntricos locais conforme a região. Portanto, era definido cada ponto de origem por métodos astronômicos e obtidas as coordenadas de latitude e longitude astronômicas, sendo estas posteriormente calculadas como coordenadas de latitude e longitude geodésicas. O desvio da vertical

era considerado nulo, e o ponto na superfície sobre o geóide era coincidente com o ponto no elipsoide, sendo, portanto, a ondulação geoidal (N) igual a zero. Dessa maneira, utilizavam-se sistemas topocêntricos locais. Além disso, eram definidos os azimutes iniciais a partir dessa origem. Finalmente, essa rede era integrada a outros vértices por processos topográficos, sendo realizadas as devidas conversões para o sistema geodésico correspondente.

Mugnier (2017) relata que em 1898 o Observatório Astronômico de Córdoba estabeleceu a longitude do círculo meridiano por meio de métodos astronômicos, obtendo-se, para a longitude que passa por esse meridiano, o valor de $\lambda_o = -68^\circ 12' 03,3''$. No entanto, a primeira estação com qualidade geodésica astronômica foi observada em 1894 no pilar geodésico no Army Barracks em Mendoza, onde se obtiveram os valores de $\varphi_o = -32^\circ 52' 54,8''$ Sul, $\lambda_o = -68^\circ 51' 22,8''$. Outros valores foram obtidos com metodologia similar, tais como Paraná 1908 ($\varphi_o = -31^\circ 44' 00,7''$, $\lambda_o = -60^\circ 31' 58,5''$) capital da província de Entre Ríos, e São Tomé 1908 ($\varphi_o = -28^\circ 32' 34,380''$, $\lambda_o = -56^\circ 02' 09,225''$). Outro *datum* que foi ocasionalmente utilizado em conexão para projetos de exploração de óleo e gás foi denominado Datum Chos Malal 1914 ($\varphi_o = -37^\circ 22' 30,3''$, $\lambda_o = -70^\circ 17' 01,8''$). Nessa época foi utilizado como elipsoide de referência o Bessel 1841, com semieixo menor (a) = 6.377.397,155 m e com achatamento ($1/f$) = 299,1528128. A longitude do círculo do Instituto Geográfico Militar (IGM) em Palermo foi determinada em 1902, correspondendo a $\lambda_o = -58^\circ 25' 25,05''$ e mais tarde transferida para Belgrano em 1910, com o valor de $\lambda_o = -64^\circ 13' 10,8''$.

Conforme relatado pelo IGN (2017), no ano de 1919 foi desenvolvida uma rede de triangulação de cerca de 110 pontos de primeira, segunda e terceira ordem, sendo materializado o sistema de referência da cidade de Buenos Aires. Além disso, o mesmo IGN (2017) menciona que em 1920 o Escritório de Cadastro da Cidade realizou a medição de uma rede de triangulação

e poligonação de cerca de 91 pontos, abrangendo a cidade de Buenos Aires por completo, sendo monumentados vértices sobre a superfície física, o que é diferente da prática de monumentalização no Brasil, feita normalmente sobre pilares de alvenaria de dimensões normatizadas e homologadas pelo IBGE.

A exemplo do que foi realizado na região de Buenos Aires, elaborou-se também em outras regiões da Argentina, sendo estabelecidos *data* topocêntricos e locais de apoio em redes de triangulação por métodos topográficos tradicionais.

A partir de 1926, segundo Mugnier (2017), o IGM passou a adotar um novo elipsoide de referência, bem como um novo sistema de projeção para os mapas topográficos. Assim, adotou-se o Gauss-Kruger Transversa de Mercator como nova projeção de sistema de articulação de folhas, em que o fator de escala na origem (k) foi definido como 1 e com meridianos centrais (MC) iguais a 72° , 69° e 66° a Oeste de Greenwich, o falso Oeste (E) como origem com valor de 500.000,000 m e o falso Norte (N) com valor de 10.002.288,299 m. Foi adotado como elipsoide de referência o Hayford 1909 e Madrid 1924, com os parâmetros correspondentes ao semieixo maior (a) = 6.378.388,000 m e achatamento ($1/f$) = 297.

Sistemas Geodésicos de Referência Campo Inchauspe

A princípio, a Argentina definiu um *datum* de integração provisório, denominado Castelli, o qual integrou os diversos sistemas locais apresentados a seguir. Assim, entre 1919 e 1914 o IGN projetou uma rede de triangulação com precisão de 1:100.000 a partir de triângulos com lados de 40 e 60 km de extensão. Para tanto, foram utilizados na época teodolitos, fios de invar e trenas. No entanto, foram geradas redes com maiores dimensões e mais espaçadas, o que proporcionou a necessidade de se realizarem

novas observações de vértices de origem por métodos astronômicos, sendo então, ao final, estabelecidos vários sistemas locais. Assim, a rede de triangulação da capital federal partiu de um vértice astronômico medido em Campo de Mayo. Já na província de Buenos Aires se partiu do lado de Mahón – Tres Flores, cujas observações foram realizadas em 1909 e 1912. Em Santa Fe as triangulações provinciais se iniciaram a partir da base de Santa Teresa – Cepeda, sendo que as coordenadas foram calculadas a partir de um ponto astronômico por método expedito no Paraná. Na província de Entre Ríos os levantamentos se realizaram a partir de 1924, sendo que os realizados nessa mesma região posteriores a 1932 partiram da base e ponto astronômico Itaembé-Mini. Em Misiones as cadeias de triangulação se iniciaram da mesma base e ponto astronômico de Corrientes. Em Mendoza, de 1928 a 1936 se realizou a medição de uma cadeia de triangulação desde Neuquén até San Juan, com apoio na base e estação astronômica de Chos Malal, e, além disso, outras estações tiveram suas coordenadas calculadas a partir do Observatório de Córdoba. Na província de Córdoba os pontos observados na capital (Córdoba) estavam no sistema Ubajay. Além disso, o Observatório de Córdoba foi utilizado como origem para todos os pontos da província situados a Oeste.

Mugnier (2017) destaca que em 1926 toda a província de Buenos Aires foi triangulada, sendo o *datum* Argentino materializado, o ponto de origem com as coordenadas $\varphi_0 = -35^{\circ}58'16,56''$, $\lambda_0 = -62^{\circ}10'12,03''$, denominado Datum Campo Inchauspe. Relata ainda que Rubén C. Rodríguez realizou em 1954 o primeiro ajustamento com iterações por meio de dupla triangulação. Já no ano de 1969 a rede geodésica foi reprocessada com cerca de 19 iterações, utilizando medições de distância mais precisas e obtidas por medidores eletrônicos de distância. Foram observadas 5 mil direções e 100 vértices, e dois geodestas argentinos ajustaram novamente a rede com o apoio do Serviço de Mapeamento dos

Estados Unidos. Assim, foi então obtido o erro médio quadrático de aproximadamente 0,4". Posteriormente, a dr. Irene Fisher coordenou o ajustamento do SAD69 (South American Datum 1969 – Datum da América do Sul 1969), incluindo esse mesmo conjunto de dados geodésicos da Argentina.

Mugnier (2017) assinala que a Argentina continuou utilizando o Datum Campo Inchauspe 1969 mesmo após o ajustamento ao SAD69 relatado anteriormente. O Datum Chos Malal foi utilizado nas montanhas centrais próximas ao Chile, e na região da Patagônia foi empregado o Datum Pampa Del Castillo (ambas as regiões de exploração de petróleo e gás). As coordenadas da origem geodésica utilizadas são: $\varphi_0 = -45^{\circ}47'30,2911''$ Leste, $\lambda_0 = -68^{\circ}05'27,7879''$ e $h_0 = 732$ m (altitude geométrica). Ambas as cartografias da região utilizavam como elipsoide de referência o Elipsoide Internacional 1967. O mesmo autor relata ainda que o primeiro sistema de referência nacional Campo Inchauspe, ao final, exigiu mais de 100 anos de trabalho, empregando-se técnicas geodésicas tradicionais e sendo criada uma rede de aproximadamente 18 mil marcos geodésicos, onde se destacam as unidades geodésicas de triangulação e poligonação.

Sistemas Geodésicos de Referência POSGAR

A primeira rede geodésica na era do posicionamento por satélite foi o POSGAR94 (Posições Geodésicas Argentinas 1994), constituindo uma rede de cerca de 127 vértices distribuídos pelo território argentino, sendo estes processados e ajustados pela equipe de geodestas da Universidade Nacional de La Plata (MUGNIER, 2017). Piñón *et al.* (2018) relatam que em 1993 o IGM tornou-se o órgão responsável no país para a aquisição de coordenadas geodésicas de primeira ordem de uma rede de aproximadamente 120 vértices geodésicos, adotando-se o POSGAR94 em substituição ao Campo Inchauspe 69 (vide LAURÍA *et al.*,

2002), com o apoio da Fundação Nacional de Ciências no âmbito do Projeto GPS dos Andes Centrais.

Mugnier (2017) aponta que o IGM publicou coordenadas geodésicas oficiais da Argentina no Datum POSGAR94, as quais fazem parte das soluções geodésicas na América do Sul e são referidas também ao WGS84, constituindo cerca de 127 vértices distribuídos homogeneamente (IGN, 2020). Assim, ainda conforme Mugnier (2017), as coordenadas geodésicas ajustadas ao POSGAR94 para a estação Campo Inchauspe foram as seguintes: $\varphi_0 = -35^{\circ}58'01,9731''$ Sul, $\lambda_0 = -62^{\circ}10'14,8175''$ Oeste e h_0 (altitude geométrica) = 106,697 m.

Conforme o IGN (2017), atualmente, os sistemas de posicionamento por satélite (por exemplo o GPS) permitem a determinação de coordenadas precisas sobre qualquer ponto da superfície terrestre de modo relativamente simples e requerem um marco de referência geodésico preciso e global, ao qual se podem vincular as medições realizadas.

Dessa maneira, no ano de 2009, o IGN oficializou o Marco de Referência Geodésico Nacional, denominado POSGAR07, substituindo o então vigente POSGAR94. O POSGAR07 constituiu a materialização sobre o território nacional argentino baseado no mais moderno sistema de referência mundial, atendendo a padrões rigorosos de acurácia e precisão. Além disso, o POSGAR07 incorporou as mais importantes redes geodésicas nacionais e provinciais em vigência, integrando-as. Ressalta-se ainda que a rede planimétrica de vértices geodésicos da Cidade Autónoma de Buenos Aires, rede antes denominada CABA (Sistema de Referência da Cidade de Buenos Aires), teve que ser integrada diretamente ao sistema POSGAR07.

Conforme relata Mugnier (2017) e o IGN (2020), foram realizadas observações por GPS (Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global) a partir de 2005, atualizando-se o sistema POSGAR07, processando os dados em consideração ao

ITRF05, e o SIRGAS2000. No entanto, a solução final foi publicada em 2009 e com a integração de cerca de 178 vértices correspondentes às estações da Rede Argentina de Monitoramento de Satélites (RAMSAC), conforme pode ser observado na Figura 2.

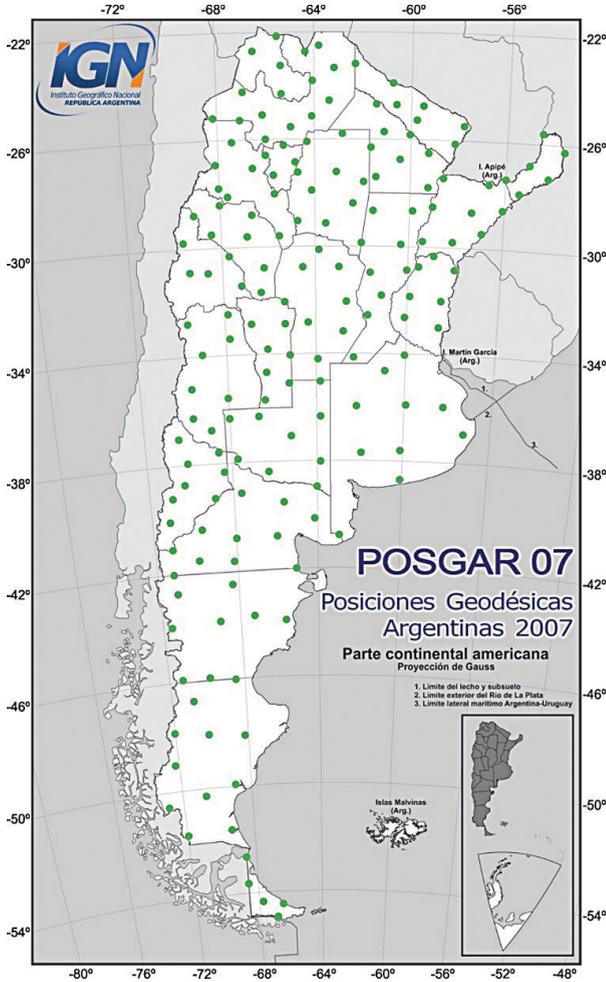


Figura 2 - Rede POSGAR07

Fonte: IGN, 2020.

Paralelamente, também foram integrados os vértices geodésicos do setor de exploração mineral, além dos vértices das redes geodésicas provinciais (Figura 3), sendo observados cerca de 500 vértices. Ao ser realizado o novo processamento e ajustamento da rede por completo, foram gerados ao final aproximadamente 4.500 vértices oficiais.

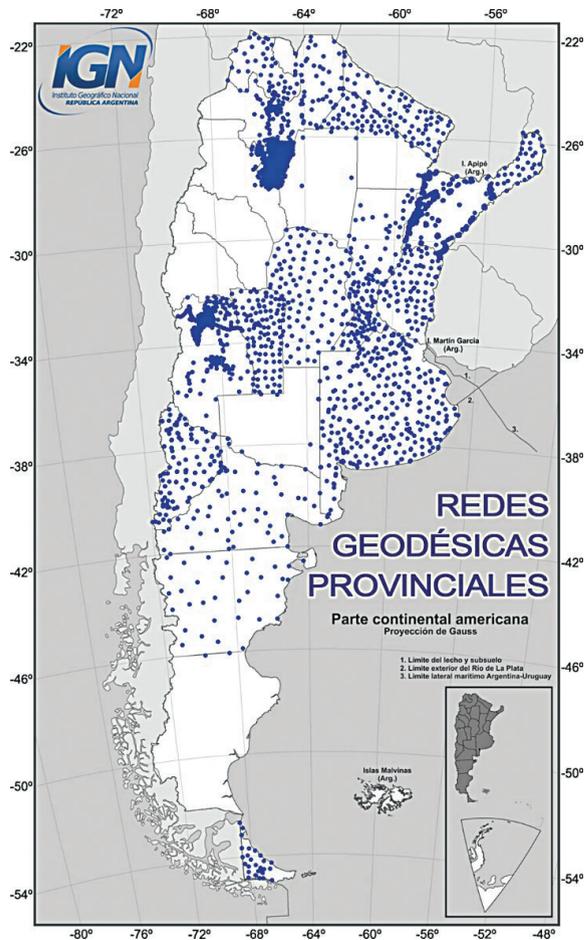


Figura 3 - Redes geodésicas provinciais

Fonte: IGN, 2020.

Atualmente, segundo o IGN (2020), a rede de vértices do POSGAR07 corresponde ao acréscimo de 50 novos vértices geodésicos que foram novamente observados, compondo o total de 436 vértices oficiais e tendo alguns destes integrados à RAMSAC, que atualmente conta com mais de 100 estações de monitoramento contínuo GNSS. Detalhes desse projeto são relatados em Piñón *et al.* (2018) e em IGN (2020). Além disso, deve-se destacar a rede de vértices que fizeram a correção NTRIP – modo de levantamento tratado amplamente em Cintra, Nero e Rodrigues (2011) e em Colombo (2008) –, rede que é denominada na Argentina de RAMSAC-NTRIP. Esta rede possui cerca de 88 vértices que podem transmitir a correção em tempo real, conforme documentado em IGN (2020).

De acordo com o IGN (2017), os parâmetros de transformação (Δx = translação em X, Δy = translação em Y) dos sistemas locais são para o Datum Campo Inchauspe. Deve-se ressaltar que os parâmetros calculados contemplaram apenas as variáveis em X e Y, e que foi aplicada uma transformação de similaridade para a definição dos parâmetros. Maiores detalhes podem ser observados em IGN (2017).

Conforme relata o IGN (2020), foi necessário um projeto de integração de todas as redes geodésicas já relatadas aqui, correspondentes às redes geodésicas dos vértices do POSGAR94, das redes geodésicas provinciais e do PASMA (setor de mineração, para algumas províncias são apenas esses parâmetros). Assim, foram realizados cálculos locais e obtidos parâmetros de transformação com os parâmetros da transformação Bursa-Wolf.

Conquistas e desafios

A concepção de uma geodésia espacial repercutiu na modelagem da superfície do planeta de modo irreversível. Obrigou a elaboração de agrupamentos (ver Quadro 2) que procurassem

assegurar procedimentos que tornassem possível uma melhor aderência ao contorno da Terra do que as técnicas clássicas de levantamento geodésico e topográfico em tempos remotos. Muitos sistemas geodésicos locais no mundo definidos historicamente com o objetivo de obter uma boa aproximação, somente em áreas de interesse, deixaram de ser utilizados. Apesar disso, os sistemas de coordenadas geodésicas locais, com elipsoides de referência escolhidos para aproximar a forma do geoide, na melhor das hipóteses, em uma dada região, são ainda usados em muitos países. Vanícek e Krakiwsky (1986) sustentam que o posicionamento e a orientação do referencial geodésico eram feitos através de seis parâmetros topocêntricos: a. coordenadas do ponto de origem (2), b. a orientação – azimute inicial de direção (1), c. ondulação geoidal (1) e d. componentes do desvio da vertical – meridiana e primeiro vertical (2).

Por outro lado, os Sistemas de Referência Terrestres contemporâneos adotam uma plataforma de referência que representa a forma e dimensões da Terra em caráter global em detrimento de uma solução local. Logo, são concebidos devido a extensas observações, a partir de satélites, do campo gravitacional terrestre, fornecendo, assim, o fundamento preciso para a organização de toda informação pertinente à Terra. São geocêntricos, por natureza. O NIMA (2000) afirma que o WGS84 está alinhado ao ITRF2008 na mesma época de 2005,0, afinado, logo, ao SIRGAS2000. Além disso, identifica quatro parâmetros de definição: o eixo semiprincipal do elipsoide WGS84, o fator de achatamento da Terra, a velocidade nominal angular média da Terra e a constante gravitacional geocêntrica.

Conclusões

O conteúdo do capítulo atentou às formas da Terra e ao tratamento dispensado para que se pudesse conceber uma expressão

espacial. Foi retratado inicialmente a forma do planeta como se fora irregular. O geoide foi a referência. Idealizada por Gauss, que dizia ser uma forma afinada ao nível médio das marés, o geodesta alemão considerou o modelo que mais se aproximava dos contornos do planeta a considerar a formação geológica e a ação de forças que atuam sobre o mesmo. Um aspecto que não foi abordado trata de uma concepção do modelo do geopotencial, como um conjunto de coeficientes da função potencial gravitacional da Terra expresso por funções harmônicas esféricas. Foi de forma deliberada, pois houve uma preocupação em centralizar os esforços em descrever aspectos afeitos exclusivamente ao *datum* horizontal – elipsoide. Foram detalhados os elementos técnicos que podem matematicamente modelar a superfície do *datum* horizontal. Foi relatado que inicialmente o Brasil, em decorrência de limitações tecnológicas, valeu-se de medições geodésicas e topográficas que procuravam materializar o elipsoide local aderido ao geoide. Com a difusão e maturidade da geodésia espacial, permitiu-se que houvesse mudanças nos paradigmas até então reconhecidos. A possibilidade de um elipsoide global se tornou uma realidade. O SIRGAS2000 refletiu esta contemporaneidade que fez o IBGE, responsável pelas diretrizes do mapeamento no país, tomar medidas que tornassem possível estas mudanças. O SGR incorporou e ajustou estações de medições que extrapolaram as fronteiras do país, tornando o referencial de local para global. Porém, as mudanças significaram transpor obstáculos que foram descritos nos diversos artigos citados. São, por exemplo, os cuidados com os parâmetros internos do *datum* horizontal. Foram praticados procedimentos matemáticos que se revelaram insuficientes para transpor de um modelo original da Terra topocêntrico para geocêntrico. Dentre os aspectos abordados, destacam-se as dificuldades de avaliar a influência das velocidades das placas tectônicas sobre as coordenadas de alvos ou localidades, a depender dos parâmetros escolhidos.

Logo, ressalta-se a percepção de sucesso na escolha de um novo SGR que possa atender ao continente americano como uno. Não é um processo acabado e definitivo. Demanda maturidade de investigar e adequar, segundo as mudanças, de modo que atenda corretamente aos novos paradigmas.

Em relação à Argentina, por outra análise, constatou-se que inicialmente os sistemas praticamente eram locais e derivados de levantamentos que se apoiavam em Astronomia, trilateração e triangulação com o emprego de levantamento topográfico assemelhado às práticas brasileiras. Provavelmente, por isso é que a princípio foram desenvolvidos os sistemas geodésicos locais. No entanto, com o advento do GPS passou-se a se realizar a integração dos diversos sistemas locais, obtendo-se, como pôde se observar, inclusive, ótimos resultados relativos à precisão de parâmetros de transformação se comparados com a metodologia analógica.

Deve-se ressaltar que primeiramente, devido inclusive à tecnologia que existia à época, percebeu-se que os sistemas geodésicos eram derivados de técnicas com base na Astronomia e Topografia, sendo estas interligadas e integradas por meio de formulações matemáticas de modo que se realizem as conversões para a área de Geodésia. No entanto, no que diz respeito à precisão e à acurácia, as limitações eram enormes, refletindo na baixa produtividade e em um esforço muito grande referente a cálculos. Porém, com a evolução tecnológica e o início das primeiras campanhas realizadas com o GPS, passou-se a obter resultados mais rápidos e precisos. Praticamente, o usual e a realidade consistiram na adoção de sistemas topocêntricos, cujo ponto de origem, obtido por técnicas de Astronomia, situava-se em um local mais adequado da superfície terrestre, vide por exemplos os *data* horizontais Córrego Alegre e SAD69, ambos adotados no Brasil, e o Campo Inchauspe (Argentina) e os locais regionais argentinos (CABA-1919 e outros), até recentemente.

Dando continuidade a essa linha de raciocínio, o GPS evoluiu para o GNSS, o que proporcionou e vem proporcionando a integração com outros sistemas de satélite e de outras agências governamentais de outros países, tal como se observa no GALILEU da Europa e no GLONASS da Rússia. Isso proporcionou a necessidade de integração, sendo então necessária a uniformização dos sistemas de posicionamento no que se refere ao *datum*, passando, assim, esses países, a exemplo de Brasil e Argentina, a adotarem os sistemas geocêntricos (a origem é o centro de massas da Terra). Em consequência disso, criou-se o conceito reunido no projeto SIRGAS2000, levando cada um desses países a realizar um projeto de transição dos seus respectivos *data* topocêntricos para o geocêntrico. Esperou-se, assim, por meio deste capítulo apresentar as experiências de ambos os países dentro dessa linha de pesquisa e a mesma praticada em outros países.

Referências

AGUIAR, C. R.; OLIVEIRA, P. C.; GALO, M. Transformação de coordenadas e datum com propagação de covariâncias. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA*, Presidente Prudente, SP, 9 a 13 jul. 2002. *Anais [...]*. Presidente Prudente, SP: UNESP, 2002. p. 113-120.

ALTAMIMI, Z. International Terrestrial Reference Frame (ITRF2005). *In: DREWES, H. (ed.). Geodetic Reference Frames*. International Association of Geodesy Symposia 134. Heidelberg, Alemanha: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

ALTAMIMI, Z. *et al. Role and Importance of the International Terrestrial Reference Frame for Sustainable Development*. 2012. Disponível em: <https://unstats.un.org/unsd/geoinfo/RCC/docs/rccap19/Side%20events/IAG-GGOS-ITRF-report2UNRRC-10Oct2012.pdf>. Acesso em: 29 maio 2020.

BRASIL. Decreto nº 5.334, de 6 de janeiro de 2005. Dá nova redação ao art. 21 e revoga o art. 22 do Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia

Nacional. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Decreto/D5334.htm. Acesso em: 20 dez. 2020.

CINTRA, J. P.; NERO, M. A.; RODRIGUES, D. GNSS/NTRIP Service and Technique: Accuracy Tests. *Boletim de Ciências Geodésicas*, n. 17, p. 257-271, 2011.

COLOMBO, O. Real-Time, Wide-Area, Precise Kinematic Positioning Using Data from Internet NTRIP Streams. *Proceedings ION GNSS 2008*, Savannah, Georgia, v. 4, set. 2008.

DALAZOANA, R. *Implicações na cartografia com a evolução do sistema geodésico brasileiro e futura adoção do SIRGAS*. 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/41206>. Acesso em: 9 jan. 2020.

IAG – International Association of Geodesy. Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS. *Boletim Informativo – Projeto SIRGAS*, n. 7, dez. 2002. Disponível em: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/bol_007.pdf. Acesso em: 20 dez. 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução PR 01/2005. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. 2005. Disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_25fev2005.pdf. Acesso em: 10 JAN. 2020.

IGN – Instituto Geográfico Nacional. Dirección de Geodesia. *Parámetros de Transformación para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires*. Buenos Aires: IGN-DG, 2017. Disponível em: https://ramsac.ign.gob.ar/posgar07_pg_web/documentos/Informe_Parametros%20de%20transformacion_CABA.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

IGN – Instituto Geográfico Nacional. *Actividades – Geodesia: introducción*. Buenos Aires, Argentina: IGN, 2020. Disponível em: <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Introduccion>. Acesso em: 9 jan. 2020.

LAURÍA, E. A. *et al.* The Vertical Reference System in the Argentine Republic. In: DREWES, H. *et al.* (ed.). *Vertical Reference Systems*. Berlin: Springer, 2002. v. 124, p. 11-15.

MAGNA JÚNIOR, J. P.; CAMARGO, P.; GALO, M. Modelagem de distorções entre SAD69 e SIRGAS2000 pelo método de Shepard e grades regulares. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 15, n. 3, p. 388-409, jul./set. 2009.

MAGNA JÚNIOR, J. P. *et al.* Transformação de coordenadas com modelagem de distorções entre SAD69 e SIRGAS2000 com o uso de Thin-Plate Splines. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 19-38, 2014.

MUGNIER, C. J. Grids & Datums: The Republic of Argentina. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 83, n. 9, p. 605-608, set. 2017.

NIMA – National Imagery and Mapping Agency. *Technical Report TR8350.2*. Bethesda, Maryland, EUA: NIMA, 2000. p. 175.

PIÑÓN, D. A. *et al.* The History, State, and Future of the Argentine Continuous Satellite Monitoring Network and Its Contributions to Geodesy in Latin America. *Seismological Research Letters*, v. 20, n. 20, p. 1-8, 2018.

SAMPAIO, A. C. F.; SAMPAIO, A. A. M. Datum Córrego Alegre: o estado da arte de sua existência ou não. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, n. 67/8, p. 1705-1713, dez. 2015. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/49245/26244>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SEALES, J.; LENARDIC, A. *Uncertainty in Planetary Thermal History Models: Implications for Hypotheses Discrimination and Habitability Modeling*. [S. l.]: ArXiv, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1910.13654.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2019.

SOLER, T.; MARSHALL, J. A Note on Frame Transformations with Applications to Geodetic Datums. *GPS Solutions*, n. 7, p. 23-32, 2003.

VANÍCEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. *Geodesy*. 2nd ed. [S. l.]: Elsevier Science, 1986.

YAO, F. *et al.* Modeling Uncertainty in Photogrammetry-Derived National Shoreline. *Journal Marine Geodesy*, v. 38, n. 2, p. 128-145, 2015.