

Projeto de Mudança de Referencial Geodésico Estudo de Caso: Área de Influência da Usina Hidrelétrica de Itaipu

**Prof. Doutoranda Mariane Alves Dal Santo ¹
Eng. Mestrando Dirceu de Menezes Machado Junior ²
Prof. Dr. Carlos Loch ³**

**¹ UFSC - Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC
88040-970 Florianópolis SC
marianedalsanto@udesc.br**

**² UFSC - Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC
88040-970 Florianópolis SC
dirceu_machado@yahoo.com.br**

**³ UFSC - Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC
88040-970 Florianópolis SC
loch@ecv.ufsc.br**

Resumo: Este artigo apresenta uma metodologia de transformação de coordenadas geodésicas do referencial SAD69 para o SIRGAS, utilizando como modelo uma propriedade rural localizada na área de influência do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Através de aplicativos do software ArcView 8.3 e parâmetros previamente estipulados pelo IBGE, simulou-se a transformação das coordenadas planas da propriedade rural e o seu deslocamento sistemático, de forma a demonstrar o efeito das mudanças de um referencial geodésico topocêntrico para um geocêntrico dentro dos parâmetros cartográficos exigidos para o cadastro técnico multifinalitário.

Palavras chaves: Sistema Geodésico Brasileiro, Referencial Geodésico, Transformação de Coordenadas.

Abstract: This paper shows one methodology for change geodetic coordinates from SAD69 reference to SIRGAS. Thus it was used one model of rural property located in the influence area of Itaipu power dam. Through applicative of ArcView 8.3 software and parameters spreaded by IBGE, it was simulated a transformation of plain coordinates of rural property, and also the systematic displacement. Besides, it was proved the real effect of changes, from a topocentric reference frame to a geocentric, considering cartographic parameters for multipurpose technical cadastre.

Keywords: Brazilian Geodetic System, Geodetic Reference Frame, Coordinate changes.

1 Introdução

Os trabalhos geodésicos implicam no posicionamento de pontos na superfície terrestre e requerem uma definição clara sobre o sistema no qual se definirão as coordenadas dos pontos. A geodésia clássica tenta resolver este problema definindo Sistemas Geodésicos Locais, denominação que expressa que seu âmbito de aplicação é reduzido, não universal.

1.1 Sistema Geodésico Topocêntrico

Um sistema geodésico local (topocêntrico) é definido pela escolha de um elipsóide de referência e por um ponto de origem (datum) de onde se estabelece sua localização em relação com a forma física da terra (geóide). Desta forma, o datum é aquele em que se faz coincidir a vertical do lugar com a normal do elipsóide (desvio da vertical nula) e geralmente se estabelece a condição de tangência entre o elipsóide e o geóide.

O elipsóide assim escolhido e posicionado, sempre que a escolha tenha sido criteriosa, se adapta bem ao geóide nas imediações do ponto datum, mas a medida que nos afastamos cresce a probabilidade de que esta adaptação diminua. Por esta razão os sistemas assim definidos foram utilizados por países e grupos de países permitindo levar adiante todos os projetos geodésicos em seus respectivos territórios.

Os sistemas geodésicos locais (topocêntricos) se materializam mediante as redes de triangulação de diversas ordens, cujos vértices se denominam pontos trigonométricos, que são executadas em várias etapas incluindo:

- Projeto das redes;
- Reconhecimento e materialização de vértices;
- Preparação de medições;
- Execução de medições angulares, de distancia e astronômicas;
- Cálculo provisório de coordenadas e, compensação e sinalização de coordenadas definitivas a cada vértice.

Todo este processo engloba a execução de numerosas determinações astronômicas, que servem para determinar equações de orientação. Estas estações astronômicas se denominam pontos Laplace e as equações que a partir delas se estabelecem se denominam equações Laplace.

Porem, os sistemas geodésicos locais (topocêntricos) apresentam problemas que vão desde o encontro de duas ou mais redes baseadas em diferentes sistemas (em zonas limítrofes) e que resultam em diferenças de coordenadas e pelo fato dos sistemas locais serem de características planimétricas e as cotas altimétricas se desenvolverem a partir de outras técnicas. Em outras palavras, não são tridimensionais.

1.1.1 No Brasil, o sistema geodésico local adotado é o SAD69

O SAD69 é um sistema geodésico regional de concepção clássica que tinha como objetivo a unificação do referencial para os trabalhos geodésicos e cartográficos na América do Sul. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE (2004), a sua adoção no Brasil se deu no final da década de 70 e sua materialização do SAD69 foi realizada por técnicas e metodologias de posicionamento terrestre, destacando-se a triangulação e poligonação.

Atualmente, as estruturas geodésicas e a grande maioria do apoio cartográfico são estabelecidas por levantamentos realizados com o GPS (Global Positioning System), por serem mais precisas e mais eficientes do que aquelas utilizadas na antiga materialização do SAD69. Conseqüentemente, surge uma dificuldade na compatibilização da documentação existente e dos levantamentos realizados com o GPS. Buscando uma solução para este problema, o IBGE vem desenvolvendo estudos sobre o ajustamento e conexão da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro – SGB tendo realizado a densificação da mesma que se configurou na realização do SAD69 (1996) e atualmente na integração ao SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

Um exemplo prático de integração ao SIRGAS é proporcionado através de posicionamento GPS a partir das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC. Ao mesmo tempo estão sendo explorados procedimentos de transformação entre sistemas, visando, desta forma, uma melhor compatibilização entre o SAD69 e o SIRGAS.

Segundo COSTA (1999), os impactos na adoção do SIRGAS como um novo sistema de referência terrestre para o Brasil, devido a mudança na forma do elipsóide e de sua posição espacial ocasiona alterações nas coordenadas planimétricas que poderão variar de 58 metros no nordeste, até 73 metros no extremo sul do país, acarretando uma variação máxima de 25 metros no contexto nacional, conforme representado na figura 1.

Geralmente, o deslocamento horizontal de um ponto em SIRGAS para SAD é nordeste, o contrário, logicamente SAD69 para SIRGAS é sudoeste, no entanto as distorções se propagam ao longo da rede.

Esta distorção estará associada a precisão dos pontos da própria rede, mesmo que a precisão dos levantamentos esteja dentro das normas estabelecidas pela legislação. Como por exemplo, a precisão de uma rede geodésica de alta precisão, estabelecida por procedimentos clássicos, deve ser melhor que 20 ppm em posições relativas ao nível de confiança de 95%. Isso conduz a uma distorção de 20 metros à distância de 1000 km. Igualmente para pontos de precisão, as especificações conduzem a até 50 metros de distorção. (IBGE, 1983)

Deve-se enfatizar que no procedimento de transformação do referencial, a magnitude e direção das distorções podem ser variáveis dentro de uma região. Em contraste, a mudança do referencial definido causa uma alteração sistemática nas coordenadas.

1.2. Sistemas Geocêntricos

Define-se como um sistema geocêntrico, aquele que é formado por três eixos ortogonais cartesianos (X, Y, Z) centrado no centro de massas da terra. Esses sistemas terrestres têm o eixo X solidário ao meridiano de origem das longitudes e o eixo Z próximo ao eixo de rotação. Portanto este sistema gira juntamente com a terra.

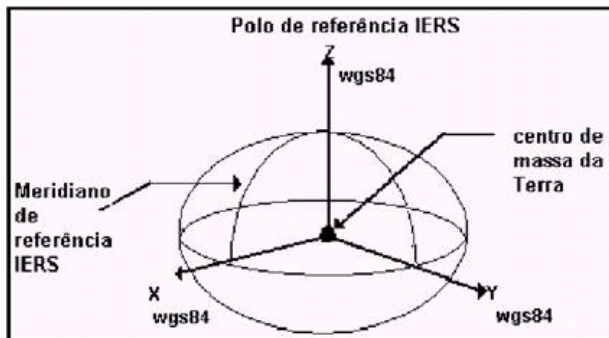


Figura 2 : Configuração de um Sistema Geocêntrico, Fonte: NIMA, 1997

A diferença entre os sistemas geodésicos locais e os sistemas geocêntricos é tridimensional e de alcance global. O conceito de ponto datum desaparece e é suplantado pela origem e orientação dos três eixos de referência.

Exemplos de sistemas geocêntricos terrestres são o WGS84 e o ITRF. E atualmente o SIRGAS, Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, a ser adotado no Brasil.

O WGS84 é a quarta versão do sistema de referência geodésico global estabelecido pelo U.S. Department of Defense (DoD) desde 1960, com o objetivo de fornecer o posicionamento e navegação em qualquer parte do mundo, através de informações espaciais. Na época de sua criação o sistema fornecia precisão métrica em função da limitação fornecida pela técnica observacional utilizada, o posicionamento Doppler.

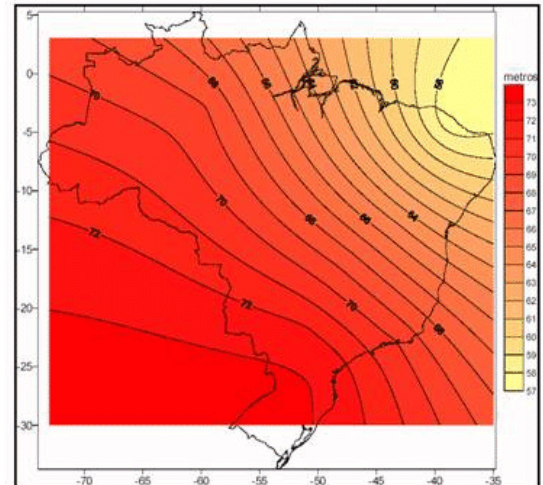
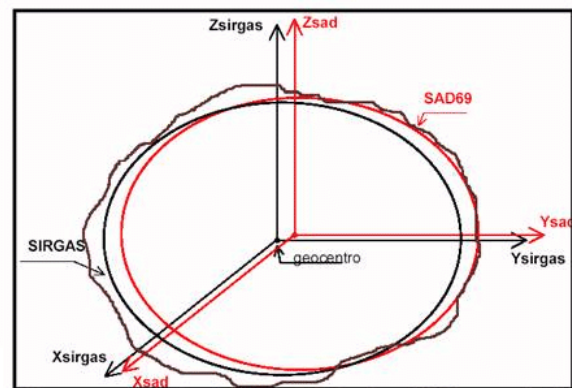


Figura 1 : Isolinhas representando o deslocamento horizontal entre os sistemas de referência SAD69 (1996) e SIRGAS. Fonte: COSTA, 1999



Diferenças na definição dos referenciais: local - SAD69 e geocêntricos (WGS84, ITRFyy e SIRGAS).

Figura 3 : Fonte: IBGE - Informativo nº 1 – Referencial Geocêntrico – 2004

Por esta razão, uma série de refinamentos foram feitos ao WGS84 nos últimos anos com o objetivo de melhorar a precisão de sua versão original [NIMA, 1997].

As melhorias na precisão do sistema WGS84 foram alcançadas através da adoção da técnica GPS nas 10 estações de controle (rede WGS84 - GPS) para a geração das órbitas operacionais e parâmetros dos relógios dos satélites.

Tabela 1 - Diferenças entre as versões do WGS84

Versão	Sistema utilizado na materialização	Número de estações utilizadas na materialização	Modelos gravitacionais da Terra	Períodos de Utilização
WGS84	TRANSIT (NSWC9Z-2)	10	WGS84	01/01/1987 à 01/01/1994
WGS84(G730)	GPS	10	WGS84	02/01/1994 à 28/09/1997
WGS84(G873)	GPS	12	EGM96	A partir de 29/09/1997

Fonte: COSTA, 1999

Sempre na busca de se definir sistemas de referência de alta precisão, a comunidade científica concebeu, na década de 80, a primeira versão de um referencial que seria o produto da combinação das técnicas de posicionamento mais precisas e disponíveis naquele momento, sendo elas: VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Range), LLR (Lunar Laser Range) e Doppler, seguindo as resoluções da UGGI (International Union of Geodesy and Geophysics) e IAU (International Astronomical Union).

Em 1988, com a criação do International Earth Rotation Service - IERS foi estabelecido um sistema de referência terrestre denominado ITRF88 (INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME). Desde esta época, o IERS vem estabelecendo anualmente, versões atualizadas destes sistemas de referência, através de novas realizações.

Em 1991, o IERS incluiu observações GPS na solução ITRF e em 1994 foi a vez da inclusão das observações oriundas da técnica DORIS (Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite). Com o estabelecimento do International GPS Service (IGS) em 1994, o ITRF está diretamente acessível aos usuários de todo o mundo através das órbitas (rápidas e combinadas), dos erros dos relógios dos satélites GPS e das coordenadas/velocidades das estações da rede global IGS (International GPS Service).

A facilidade proporcionada pelo IGS na obtenção de soluções ITRF, mediante a utilização de seus produtos, associada à popularização do GPS, fomentaram as densificações dos ITRFyy através dos sistemas de referência regionais, em fase de implementação por países de todo o mundo. Dois exemplos de redes regionais são EUREF (European Reference Frame) e SIRGAS.

Tabela 2 – Versões do ITRF e suas particularidades

Versão (época de referência)	Número de Soluções utilizadas						Número de Estações
	VLBI	SLR	LLR	GPS	DORIS	Multi-Technique	
ITRF-0(1988.0)	2	2	-	-	-	-	-
ITRF-88(1988.0)	6	5	4	-	-	-	-
ITRF-89(1988.0)	4	6	2	-	-	-	-
ITRF-90(1988.0)	4	7	2	-	-	-	121
ITRF-92(1988.0)	5	6	3	6	-	-	152
ITRF-93(1993.0)	6	4	4	1	-	-	157
ITRF-94(1993.0)	4	2	-	3	3	-	201
ITRF-96(1997.0)	4	2	-	8	3	-	290
ITRF-97(1997.0)	4	5	-	6	3	1	314

Fonte: Modificado de COSTA, 1999

1.2.1 O Sistema SIRGAS

O SIRGAS é uma cadeia americana de GPS que materializa o Marco de Referência Terrestre Internacional (ITRF-International Terrestrial Reference Frame) para a América do Sul (GEORGIADOU & FALCÓN, 1996).

O projeto SIRGAS, Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, foi estabelecido em outubro de 1993 durante a Conferência Internacional para a Definição do Datum Geocêntrico Sul-americano, em Assunção, Paraguai. Conta com os auspícios da Associação Internacional de Geodésia, O Instituto Pan-

americano de Geografia e História e a Agência Nacional de Imagens e Cartografia dos Estados Unidos da América.

As realizações SIRGAS correspondem as densificações do ITRF (International Terrestrial Reference Frame) no continente americano por ser este mais preciso e servir de modelo para o refinamento do WGS 84 (World Geodetic System 1984) definido pela NIMA (National Imagery and Mapping Agency), conforme esquematizado pela figura 4, observando que O WGS 84 (G1150) é essencialmente idêntico ao ITRF 2000, ao nível de precisão de um centímetro.

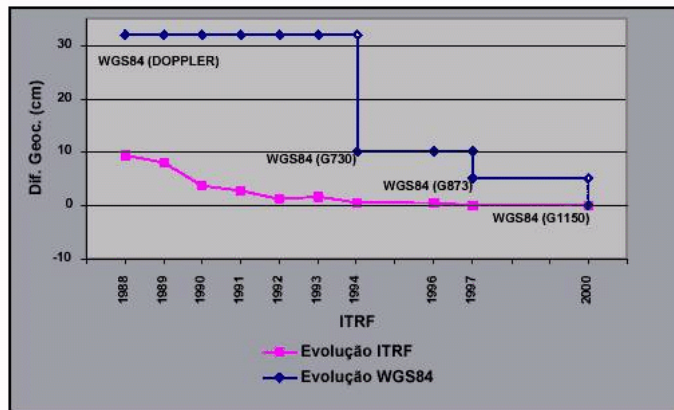


Figura 4 : Evolução dos Sistemas ITRF e WGS84

Fonte: IBGE - Informativo nº 2 – Referencial Geocêntrico - 2004

A realização SIRGAS 2000 (Figura 5) é mais completa e recente do que o SIRGAS 95, compreendendo 182 estações nas Américas do Sul, Central e do Norte e no Caribe e tem um número maior de estações no território nacional (21 estações) do que a última realização do International Terrestrial Reference System – ITRS, ou seja, o ITRF 2000 (9 estações), apesar do seu ajustamento conter menor quantidade de observações.

No que se refere às velocidades, necessárias à completa realização do sistema, as mesmas foram previstas para divulgação oficial para a América do Sul até 28 de março de 2003. Ressalta-se que a determinação se restringe à América do Sul, consequência de somente esta região possuir duas realizações SIRGAS. A época a ser adotada é 2000,4.

O projeto SIRGAS difundiu também que os procedimentos que os países deverão seguir para obter redes geodésicas GPS com mais alta precisão e confiabilidade. Isto implica que todas as redes nacionais sejam estabelecidas em um mesmo sistema de referência e época.

2 Transformações entre Sistemas Geodésicos de Referência

A transformação de coordenadas entre sistemas de referência distintos é um problema que aparece freqüentemente na agrimensura e na geodésia. Antes de abordar o tema, convém diferenciar as etapas que unidas levam a solução global do problema.

- a) Determinar os parâmetros de transformação
- b) Transformar as coordenadas

Pode ser que primeira etapa não seja necessária, porque se dispõe de parâmetros de transformação previamente determinados. Sem dúvida, é útil entender conceitualmente os problemas que se apresentam na determinação de parâmetros de transformação, para compreender as limitações com que os mesmos podem ser aplicados. Ainda que a etapa (a) precede a (b), por razões didáticas, a discussão será abordada em ordem inversa.

2.1 Transformação de coordenadas SAD69 (1996) para SIRGAS 2000

Com o objetivo de representar graficamente como se comportam as transformação de sistemas de referencia a nível de propriedade rural, descrevemos as etapas desenvolvidas.

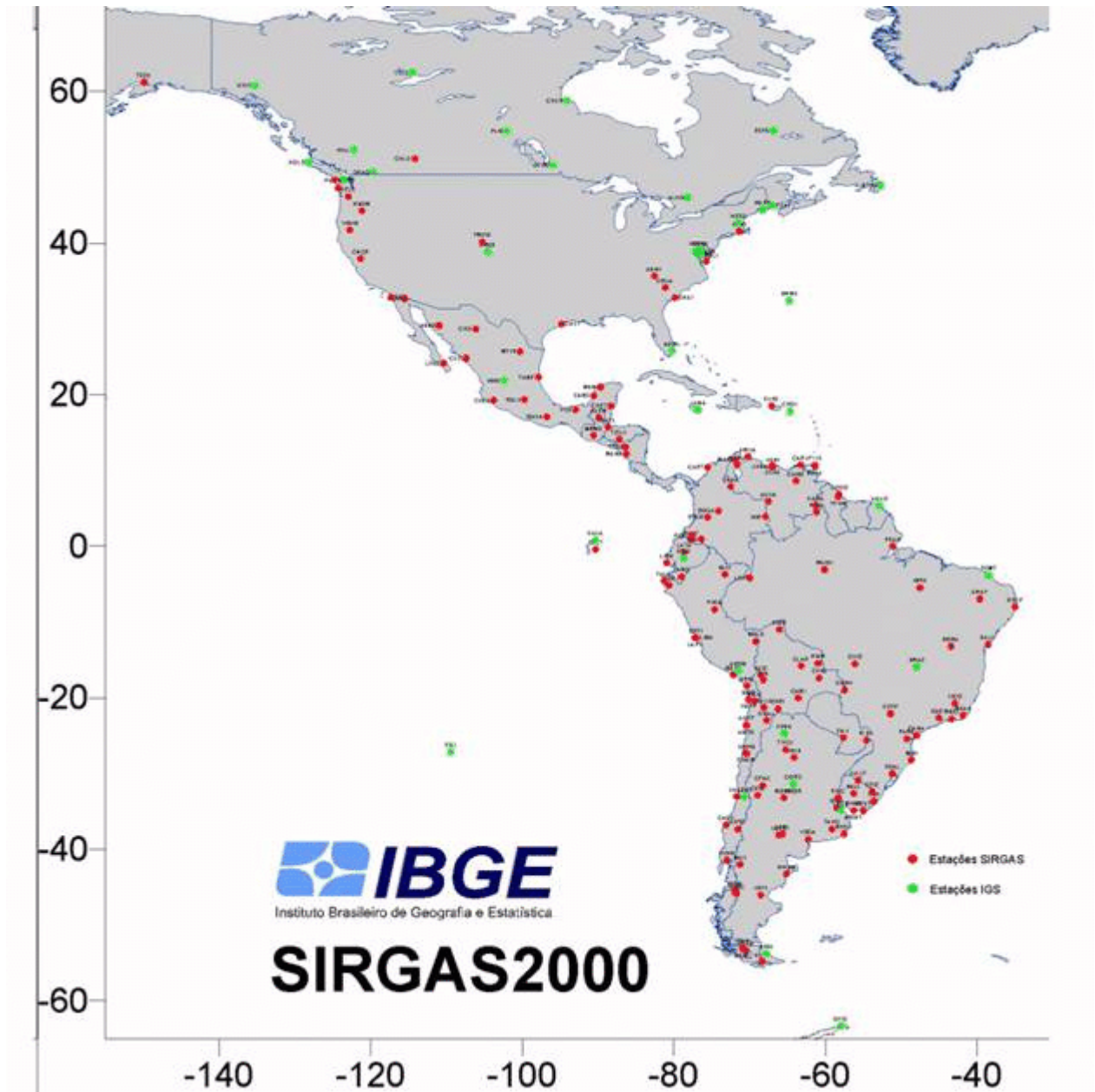


Figura 5 : Distribuição das Estações SIRGASFonte: IBGE, Realização SIRGAS 2000 - 2004

2.1.1 Cálculo dos parâmetros de transformação entre SAD69 (1996) e SIRGAS 2000:

Foi utilizado o aplicativo Arc ToolBox (ArcView 8.3) – Função Project Wizard- New Geographic Transformation para os cálculos dos parâmetros de transformação adotando-se o modelo matemático de Molodensky indicado pelo IBGE, através da RESOLUÇÃO No 23, de 21 de fevereiro de 1989.

Nesta modelagem são apresentados 3 parâmetros de translação das coordenadas (x, y, z), representando o relacionamento geométrico entre dois sistemas cartesianos ortogonais. As diferenças de origem de

cada sistema são corrigidas através das translações (uma em cada eixo coordenado). As rotações fundamentais, podem ser consideradas a partir do momento que o paralelismo entre os sistemas não é assegurado na prática.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados: Translação das coordenadas x, y e z

SAD/SIRGAS	Translação em x (m) / α	Translação em y (m) / α	Translação em z (m) / α
Parâmetros	-67.327 m +- 0.036 m	+3.899 m +- 0.036 m	-38.292 m +- 0.036 m

Fonte: IBGE/2004 - Valores preliminares (NÃO OFICIAIS) de parâmetros de SAD69 para SIRGAS.

2.1.2 Resultados alcançados após a transformação:

Após a aplicação dos parâmetros de translação das coordenadas X, Y e Z, obteve-se um vetor de deslocamento médio da área da propriedade na ordem de 62,796 metros na direção sudoeste. As coordenadas planas dos vértices da propriedade sofreram um deslocamento médio de 47,850 metros em X e 40,667 metros em Y.

A tabela 4, apresenta o valor das coordenadas planas da propriedade no Sistema SAD 69, o valor das coordenadas planas dos vértices da propriedade após a transformação das coordenadas para o Sistema SIRGAS e as diferenças das coordenadas por vértice entre os Sistemas de Referência.

Tabela 4 – Comparação entre os valores das coordenadas dos vértices da propriedade

Vértice	Vértices da Propriedade no Sistema SAD 69 (1996)		Vértices da Propriedade no Sistema SIRGAS 2000		Diferença por Vértice	
	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada X	Coordenada Y
0	841.764,455	7.232.813,327	841.716,607	7.232.772,662	47,848	40,665
1	842.239,045	7.233.791,336	842.191,196	7.233.750,669	47,849	40,667
2	842.697,651	7.233.414,596	842.649,801	7.233.373,929	47,850	40,667
3	843.209,375	7.234.025,568	843.161,525	7.233.984,900	47,850	40,668
4	843.517,446	7.233.917,885	843.469,595	7.233.877,217	47,851	40,668
5	842.953,314	7.233.210,169	842.905,464	7.233.169,503	47,850	40,666
6	842.586,804	7.232.342,021	842.538,954	7.232.301,356	47,850	40,665
Média da diferença por vértice					47,850	40,667

2.1.2.1 Mapas resultantes

Os resultados alcançados podem ser melhor visualizados nos mapas apresentados nas figuras 6,7 e 8.

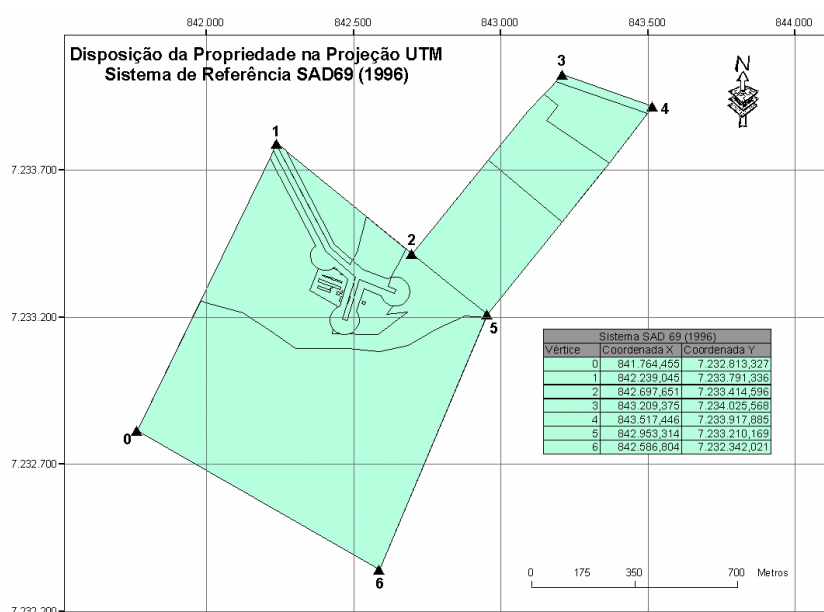


Figura 6 : Distribuição da Propriedade no Sistema SAD69 (1996)

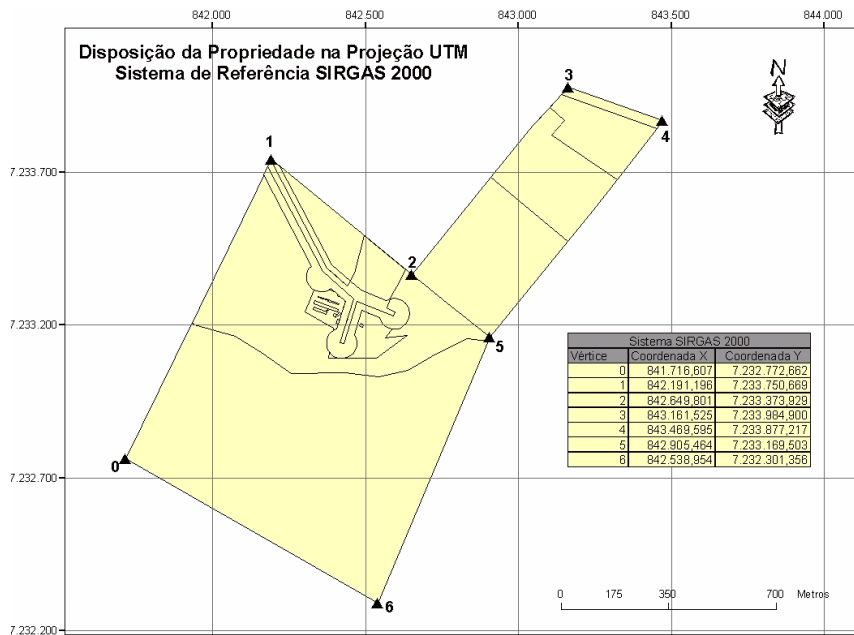


Figura 7 : Distribuição da Propriedade no Sistema SIRGAS 2000

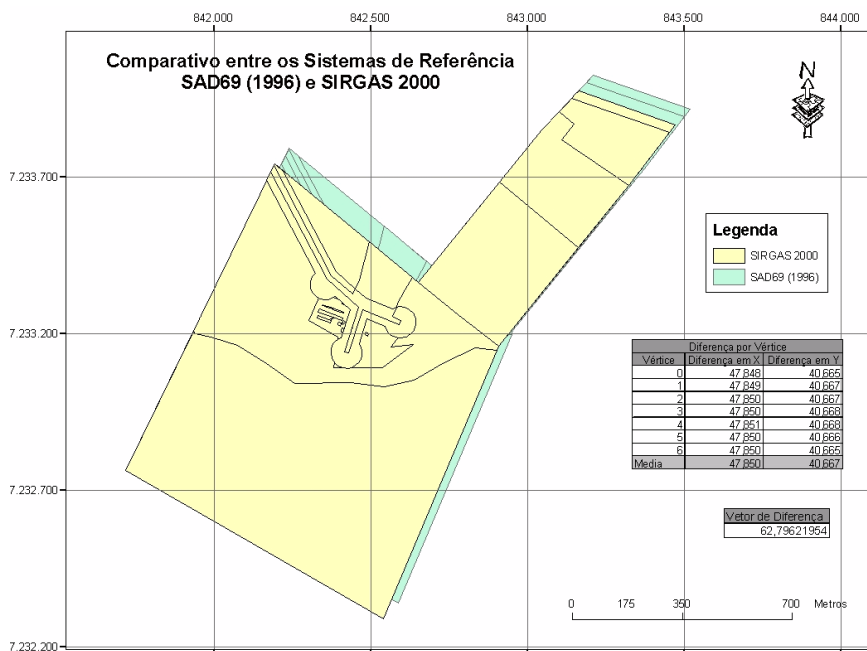


Figura 8 : Comparativo entre os Sistemas de Referência

3 Análise dos resultados

A utilização do modelo é uma solução provisória, uma vez que ainda não foram oficializados pelo IBGE, os parâmetros de transformação informados.

O procedimento de transformação de coordenadas apresentado usa parâmetros previamente calculados entre o Sistema Geodésico Brasileiro e Sistemas Geodésicos Internacionais baseados em medidas GPS. Uma vez que exista uma implementação dos pontos geodésicos isto virá a beneficiar a melhoria nos parâmetros de transformação das coordenadas da área.

Buscou-se, desta forma, avaliar os parâmetros de transformação disponibilizados pelo IBGE entre os Sistemas de Referência SAD69 e SIRGAS.

A alteração sistemática das coordenadas da área de estudos se dá em direção sudoeste, com vetores médios entre os vértices da propriedade aproximadamente de 62 metros. Este valor está de acordo com os resultados encontrados na aplicação do sistema para parâmetros locais levando-se em conta que as distorções se propagam ao longo da rede.

A transformação entre os sistemas não afeta a precisão relativa entre as coordenadas dos vértices da propriedade uma vez que o deslocamento se dá de forma sistemática. As precisões relativas das posições foram mantidas porque a transformação é similar para todos os pontos e, uma vez que as diferenças entre as coordenadas são conhecidas, as transformações foram feitas de forma direta.

4 Conclusões e Recomendações

No Brasil, a adoção de um sistema de referência geocêntrico, virá de encontro a necessidade de se buscar uma compatibilidade com os demais países sul-americanos, que determine um referencial único que atenda os padrões globais de posicionamento e que formatize as normas cartográficas no continente, garantindo a qualidade e a precisão dos levantamentos hoje fundamentados no GPS.

Particularmente em áreas de fronteira, como é o caso desta pesquisa que se confronta com o Paraguai e a Argentina, formando a Itaipu Binacional, a consolidação desta aplicação se concretiza no seu principal objetivo, o desenvolvimento de procedimentos para a transformação de coordenadas SAD69 para SIRGAS, ligada a necessidade de se compatibilizar dados cartográficos, em escala cadastral que correspondam às necessidades de atendimento a um padrão internacional de referenciamento.

5 Bibliografia

COMITE NACIONAL DE LA UNION GEODÉSICA Y GEOFÍSICA INTERNACIONAL. *Sistemas Geodésicos*, Argentina, 1ª Edición, 1999.

COSTA, Sonia Maria Alves. *Integração da Rede Geodésica Brasileira aos Sistemas de Referência Terrestres*. Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, 1999.

GEMAEL, Camil. *Introdução ao Ajustamento de Observações*. Aplicações Geodésicas, Curitiba, Ed. UFPR, 1994.

GEORGIADOU Yola; FALCÓN, Eduardo Fernández. *El futuro de las Redes de control Geodésico en Sudamérica y los Nuevos Conceptos para los levantamientos Catastrales*. 30 de Septiembre al 4 de Octubre de 1996 La Plata, Provincia de Buenos Aires

MONICO, Galera João Francisco; CAMARGO, Paulo de Oliveira. *Controle de Qualidade em Levantamentos Geodésicos e Possibilidade de Metodologia para atender a Lei 10.267*, Universidade Estadual Paulista, Campos de Presidente Prudente, Departamento de Cartografia.

NIMA - National Imagery and Mapping Agency, Department of Defense World Geodetic System 1984, NIMA TR 8350.2, Third Edition, 171p., 1997.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos. Coletânea das Normas Vigentes*. Rio de Janeiro, 1998.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Projeto Mundança do Referencial Geodésico – Processo de Transição - GT 2 - Grupo de Trabalho 2 *Definição e Estratégias para Materialização do Sistema de Referência Geodésico* Home page: <http://www.ibge.gov.br/geodesia> , acessado em maio de 2004

IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Brasileiro*. RPR n 22/83, Boletim de Serviço 1602(Suplemento), Rio de Janeiro, 1983.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Ajustamento da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro* - Relatório, Rio de Janeiro, 1996.

~ **IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** *SIRGAS - Relatório Final*, AG97 Rio de Janeiro, 1997.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Boletim Informativo nº 1 - http://www.ibge.gov.br/home/geografia/geodesico/srg/Documentos/Informativo_1.pdf, acessado em maio de 2004.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Boletim Informativo nº 2 http://www.ibge.gov.br/home/geografia/geodesico/srg/Documentos/Informativo_2.pdf - acessado em maio de 2004

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Realização Sirgas 2000 - http://www.ibge.gov.br/home/geografia/geodesico/sirgas/sirgas_tot.pdf, acessada em maio de 2004.

~ **IERS** – International Earth Rotation Service. ITRF Solutions, Home page: <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/> consultada em maio de 2004

OLIVEIRA, L. C.. *Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro associadas ao SAD69. Uma proposta metodológica de transformação*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, tese de doutorado, São Paulo, 1998.