

CAPÍTULO 4 – SISTEMAS GEODÉSICOS ADOTADOS NO BRASIL

No Brasil, a produção cartográfica, assim como a geodésica, está baseada em diferentes sistemas de referência. Nas décadas de 40, 50 e 60, épocas da implantação da Rede Planimétrica Brasileira, foram utilizados métodos clássicos no estabelecimento das grandes redes de triangulação e densificação com poligonação. O primeiro ajustamento da rede, foi referido ao sistema Córrego Alegre, usando o método das equações de observação. Um segundo ajustamento foi feito, dividido em duas fases. Na primeira utilizou-se o sistema computacional *Horizontal Adjustment by Variation of Coordinates* denominado (HAVOC), mediante o estabelecimento do sistema *South American Datum* (SAD-69). Na segunda fase desse ajustamento, houve uma densificação da rede com novos levantamentos geodésicos ajustados no programa *Users System for Horizontal Evaluation and Reduction* (USHER). Em 1996, houve um reajustamento simultâneo da rede usando-se a técnica de Helmert Blocking [BEATTIE, 1987, apud, COSTA, 1999], disponível no sistema *Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial Data* (GOSTH), onde os parâmetros definidores do SAD-69 foram mantidos. Tendo em vista os avanços tecnológicos e científicos, e os sistemas ditos clássicos não possuem uma precisão compatível com as atuais técnicas de posicionamento, optou-se por uma mudança no sistema referencial geodésico, que deixaria de ter sua origem com orientação topocêntrica para ter sua origem com orientação geocêntrica, ou seja no centro de massa da Terra, sendo compatível com a rede geodésica internacional. No Brasil será adotado o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) (capítulo 6), que foi definido na Conferência Internacional para a definição de um Datum Geocêntrico para a América do Sul, no ano de 1993, em Assunção - Paraguai. Foi recomendado pela *7 th United Nations Regional Cartographic Conference for the Americas*, patrocinada pela Organização das Nações Unidas (ONU), realizada em Nova York, no período de 22 a 26 de janeiro de 2001 [IBGE 2003].

No Brasil, os sistemas geodésicos, Córrego Alegre, Datum Astro-Chuá, SAD-69 (Realização inicial) e SAD-69 (Realização 1996), foram utilizados no mapeamento sistemático ao longo dos anos e têm produtos realizados até hoje. A adoção de um novo referencial, vai exigir a integração dos dados e bases cartográficas já existentes com os novos produtos referidos a este novo referencial.

4.1 CÓRREGO ALEGRE

Adotou-se no Brasil, em função do primeiro ajustamento da rede planimétrica do SGB, na década de 50, o Sistema de Referencial Geodésico Córrego Alegre, o qual tinha como origem planimétrica o vértice de mesmo nome, usando como figura geométrica o elipsóide internacional de Hayford. Neste ajuste, foi utilizado o método das equações de condições (método dos correlatos). A escolha deste vértice para ponto Datum e deste elipsóide foi baseada em determinações astronômicas realizadas na implantação da cadeia de triangulação em Santa Catarina. Verificou-se, na ocasião, que os desvios da vertical na região tinham uma tendência para o leste, ou seja, constatando uma maior concentração de massas a oeste e deficiência das mesmas a leste, concluindo que o ponto Datum a ser escolhido ficaria melhor situado na região do planalto.

O Datum planimétrico considerado para o sistema, foi um vértice de primeira ordem implantado em 1949, localizado no município de Frutal, Minas Gerais.

Foram adotados os seguintes parâmetros na definição deste Sistema [IBGE, 2004]:

Figura Geométrica da Terra : Elipsóide Internacional de Hayford 1924.

semi-eixo maior : 6378388 metros.

achatamento : 1/297

Ponto Datum : Vértice Córrego Alegre.

Latitude $\varphi = 19^{\circ} 50' 14.91''$ S

Coordenadas: Longitude $\lambda = 48^{\circ} 57' 41.98''$ W

Altitude $h = 683,81$ metros

Orientação elipsóide-geóide no ponto Datum :

$\xi=\eta=0$ (componentes do desvio da vertical – Seção meridiana e 1º vertical),

$N^*=0$ metros (ondulação geoidal).

O Datum altimétrico considerado para o sistema, coincide com a superfície equipotencial que contém o nível médio do mar, definido pelas observações maregráficas tomadas na baía de IMBITUBA, no litoral do Estado de Santa Catarina.

A fim de se obter um único Sistema de Referência para a América do Sul e a necessidade do conhecimento mais detalhado do geóide no continente, foram realizadas com o apoio do então *Defense Mapping Agency* (DMA) dos EUA, várias observações astronômicas nos vértices das cadeias de triangulação de alguns países da América do Sul. Inicialmente os estudos conduziram ao estabelecimento do *Provisional South American Datum of 1956*, um Datum provisório conhecido como PSAD-56, com origem no vértice La Canoa (Venezuela) e que usava como referência o elipsóide internacional de 1924, aceito pela

Assembléia Geral da Associação Geofísica Internacional (IAG). A materialização deste sistema ocorreu por uma rede de triangulação desde a Venezuela até o Uruguai e por uma rede de trilateração HIRAN (*High Precision Short-Range Navigation*), desde a ilha de Curaçau no mar do Caribe, até o arquipélago de Fernando de Noronha. O encadeamento da rede PSAD-56 foi implantada com a finalidade de se ter abrangência continental, em relação as diversas materializações nacionais; mas, com fraca adaptação geóide-elipsóide no ponto origem do PSAD-56 devido ao fato de as comparações no Chile, indicarem um afastamento de 282m da superfície geoidal abaixo da elipsoidal, fez com que se pensasse na mudança do ponto Datum.

Em 1956, o IBGE iniciou o programa para a determinação do vetor de orientação geocêntrica para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) até então referido ao Sistema Córrego Alegre, foram determinadas 2113 estações gravimétricas em torno do vértice Córrego Alegre em uma área circular de 300 km ao seu redor. Em consequência de obras de urbanização, este vértice foi destruído e o centro da área transferido para o vértice Chuá da mesma cadeia de triangulação do vértice Córrego Alegre. Em 1966, com um novo ajustamento, ficou definido um novo sistema de referência denominado Astro Datum-Chuá, utilizando o vértice Chuá, sendo que o Sistema de Referencial Geodésico Córrego Alegre permaneceu em uso até 1970 [OLIVEIRA, 2002].

4.2 ASTRO DATUM-CHUÁ

O sistema Astro Datum-Chuá, foi na realidade um ensaio ou referência para a definição de um novo sistema referencial que seria o SAD-69. Teve sua origem planimétrica no vértice Chuá e utilizava também o elipsóide de referência de Hayford. Estabelecido segundo a técnica de posicionamento astronômico, desenvolveria o papel de um sistema razoável a ser utilizado unicamente na uniformização dos dados disponíveis na época, estabelecendo um controle de orientação nos levantamentos planimétricos, (o IBGE tinha recém concluído um ajustamento da rede planimétrica referido a este sistema). Não representava ainda o melhor sistema para a América do Sul, pois faltava ainda a boa adaptação geóide-elipsóide para que as observações geodésicas terrestres pudessem ser reduzidas à superfície do elipsóide. Como era um sistema provisório, as componentes do desvio da vertical foram ignoradas, ou seja, foi assumida a coincidência entre geóide e elipsóide, no ajustamento das coordenadas em Astro Datum Chuá.

4.3 O SOUTH AMERICAN DATUM SAD-69

O SAD-69 é um sistema geodésico regional de concepção clássica [CASTAÑEDA, 1986], onde vinculadas a ele estão as redes clássicas de triangulação e poligonação, as redes de estações TRANSIT (Sistema do U.S. *Navy Navigation Satellite System* - NNSS) e as redes GPS de alta precisão. Em 1969, o Comitê de Geodésia reunido na XI Reunião Pan-americana de Consulta sobre Cartografia teve aprovado pelo seu grupo de trabalho, a utilização deste referencial por todos os países da América do Sul, a qual não foi seguida pela totalidade dos países. Só em 1979, veio a ser oficialmente adotado como referencial geodésico brasileiro.

O projeto do Datum Sul Americano deveria estabelecer um sistema geodésico, de modo que seu respectivo elipsóide tivesse boa adaptação regional ao geóide, e, em âmbito continental, fazer o ajustamento de uma rede planimétrica referida a esse novo sistema definido. Também como melhora, por recomendação da *International Union of Geodesy and Geophysics* (UGGI), foi adotado o elipsóide GRS67 em substituição ao de Hayford, onde foram fixados parâmetros topocêntricos para o seu posicionamento espacial. O posicionamento se deu no ponto origem, Vértice Chuá, com as componentes do desvio da vertical (ξ , η) e a ondulação geoidal (N^*), cujos valores foram determinados de forma a otimizar a adaptação elipsóide-geóide no continente. Também foram fornecidas as coordenadas geodésicas do ponto origem e do azimuth geodésico da direção inicial Chuá-Uberaba, as quais vieram a definir o sistema.

Os seguintes parâmetros foram adotados na definição deste Sistema [IBGE, 2004]:

Figura Geométrica da Terra: Elipsóide Internacional de 1967(UGGI-67).

semi-eixo maior : 6378160 metros.

achatamento : 1/298,25

Orientação Geocêntrica:

Eixo de rotação paralelo ao eixo de rotação da Terra; plano meridiano origem paralelo ao plano meridiano de GREENWICH, Como definido pelo *Bureau International de 1' Heure* (BIH).

Orientação Topocêntrica:

Ponto Datum : Vértice Chuá, na cadeia de triangulação do paralelo 20° S.

Latitude $\varphi = 19^{\circ}45' 41''.6527$ S

Coordenadas: Longitude $\lambda = 48^{\circ}06' 04''.0639$ W

Altitude ortométrica : 763.28 metros

Orientação elipsóide-geóide no ponto Datum :

$\xi=0.31''$ $\eta=-3.52''$ (componentes do desvio da vertical – Seção meridiana e 1º vertical)

$N^*=0$ metros (ondulação geoidal)

Azimute (Chuí – Uberaba) $271^\circ 30' 04,05''$

O Datum altimétrico considerado para o sistema, coincide com a superfície equipotencial que contém o nível médio do mar, definido pelas observações maregráficas tomadas na baía de IMBITUBA, no litoral do Estado de Santa Catarina.

Na década de 60, vários países fizeram o primeiro ajustamento da rede planimétrica continental do SAD-69. Neste ajuste, cadeias de triangulação tiveram seus dados homogeneizados adotando-se o mesmo tratamento. Como as redes eram muito extensas e havia limitações computacionais na época, houve a necessidade de divisão da rede para que pudessem ser processadas separadamente. A rede brasileira foi dividida em 10 áreas. O método escolhido para o ajuste, foi o conhecido como “piece-meal”, no qual uma vez ajustada uma determinada área, as estações das áreas adjacentes, comuns à ajustada, se mantinham fixas, de modo que cada estação da rede só tinha um par de coordenadas correspondentes. Este procedimento foi mantido no processo de densificação da rede planimétrica após a conclusão do ajustamento em SAD-69, sendo uma das causas do acúmulo de distorções geométricas (escala e orientação) na rede planimétrica. Mapas geoidais pouco precisos foram usados para a aplicação das reduções das observações em alguns trechos da rede, por serem os únicos existentes na época e a diversidade de instrumentos e métodos utilizados no decorrer do estabelecimento da rede também tornaram complexa a análise da precisão das coordenadas das estações. Fatos como esses e também o avanço tecnológico cada vez mais emergente, levou a necessidade de um reajustamento da rede, desta vez global, o qual foi realizado em 1996, definindo-se o SAD-69 como referencial oficial a ser adotado no Brasil. Neste reajustamento, foram mantidos os mesmos parâmetros definidores e injunções iniciais do primeiro ajustamento. Sendo assim, forçosamente deve-se manter a mesma denominação para o sistema de referência SAD-69 na sua nova materialização após o reajustamento. Também foi usada a técnica de posicionamento através do sistema de satélites GPS, o qual causou mudança na componente planimétrica devido ao fato de serem estabelecidas simultaneamente as três componentes definidoras de um ponto no espaço. Esta modificação, criou a necessidade de se fazer os ajustamentos da rede em três dimensões, e foi conseguido, graças ao reajustamento global da rede brasileira, usando-se o sistema computacional chamado GHOST, que foi desenvolvido no Canadá para o projeto *North American Datum of 1983 (NAD-83)* [COSTA, 1999]. Neste reajustamento, fizeram parte as observações de

satélites GPS e as observações referentes à rede clássica, formando um grupo de 4759 estações contra as 1285 ajustadas na realização inicial. A Tabela 4.1, mostra um comparativo entre as duas realizações do SAD-69.

Tabela 4.1
Observações utilizadas no ajustamento da materialização original do SAD-69 e a materialização de 1996.

Observações	SAD-69 Materialização original	SAD-69 Materialização 1996
Estação fixa	1 (Chuá)	1 (Chuá)
Nº de linhas de base	144	257 (triangulação) 1270 (poligonação)
Nº de estações astronômicas	144	389
Nº de direções horizontais	6865	16907
Nº de linhas de base GPS	-	-
Nº de posições Injuncionadas (Doppler)	-	179

Fonte: IBGE, 2004.

Como foram utilizadas técnicas diferentes nas duas realizações, a ligação entre elas foi feita através de 49 estações da rede clássica observadas por GPS, tendo como função o controle da rede. O reajustamento também forneceu como informação importante o erro absoluto e o desvio padrão. A Tabela 4.2, mostra os valores médios dos erros das coordenadas obtidas após o reajustamento.

Tabela 4.2
Valores médios dos erros das coordenadas, obtidos após o reajustamento.

Precisão	Estações GPS	Estações da rede clássica
Planimétrica (horizontal)	10 cm	40 a 70 cm
Altimétrica (vertical)	10 a 30 cm	-

Fonte: IBGE, 2004.

Dois efeitos combinados causam a mudança de coordenadas das estações em um reajustamento da rede planimétrica:

- Quando se alteram a definição e a origem do ponto Datum, mas não existe nenhum efeito de alteração da forma da rede e este pode ser estimado por uma transformação de similaridade, desde que se conheça a relação entre os referenciais novo e antigo, no tocante às translações, rotações e escala.
- A inclusão de novas observações e metodologias de ajustamento, as quais alteram a geometria (forma) da rede, e é denominada “distorção da rede”, sendo que não pode ser estimada através de uma transformação de similaridade (COLLIER, Apud COSTA, 2000). Foi o que ocorreu com o reajustamento da rede planimétrica brasileira, em que os parâmetros definidores do SAD-69 foram mantidos, cabendo só a alteração na quantidade de estações/observações e metodologia de ajustamento.

Na Tabela 4.3, são apresentadas informações importantes sobre o comportamento das distorções ao longo da rede planimétrica, para uma análise inicial. Os valores das distorções (média e máxima) são obtidos analisando-se as diferenças de coordenadas entre a materialização original e a de 1996. Observa-se que a distorção máxima encontrada na rede é da ordem de 15 metros, obtendo-se uma média de 4 m.

Tabela 4.3
Análise das distorções segundo cada bloco de ajustamento da rede.

Blocos de Ajuste	nº de estações comuns	Distorção média (m)	Distorção máxima (m)
Rio G. do Sul, Santa Catarina, Paraná	518	7,509	13,846
Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná	736	5,991	14,873
Mato Grosso, Mato Grosso do Sul	580	5,269	12,706
Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais	482	2,548	5,296
Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Tocantins	1.202	4,296	14,178
Paraná, Alagoas, Sergipe, Bahia	464	4,015	5,537
Bahia, Minas Gerais	403	2,091	4,353
Goiás	572	2,295	13,881

Fonte: IBGE, 2004.

Para uma melhor visualização do comportamento das distorções a nível nacional, a Figura 4.1 mostra as diferenças entre as duas materializações do SAD-69 na forma vetorial.

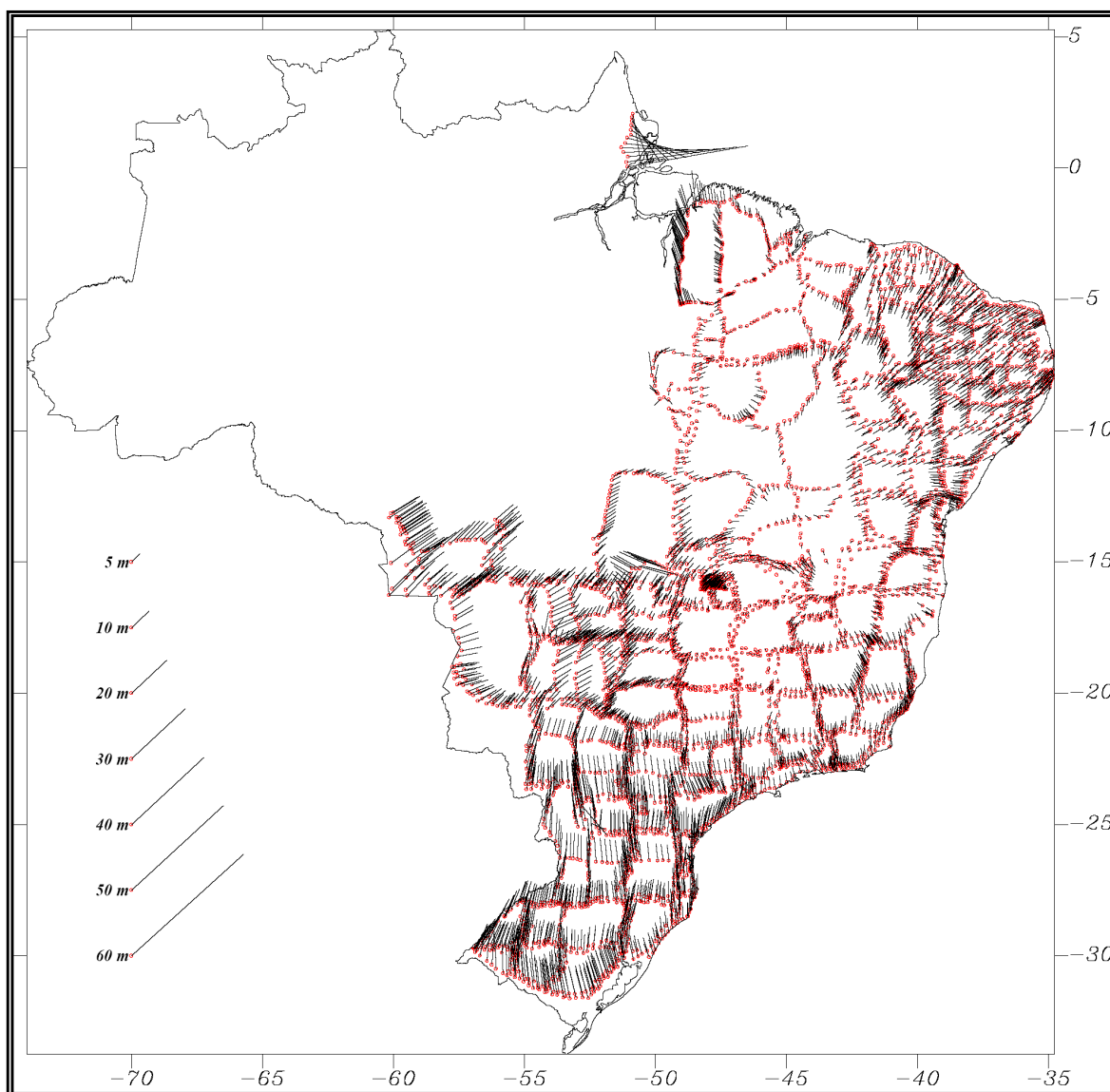


Figura 4.1 - Representação, na forma vetorial, da diferença entre as coordenadas horizontais das materializações: original e a do ano de 1996 do SAD-69.

Fonte: IBGE, 2004.

Uma das questões decorrentes dessa mudança, é quando se tem uma base cartográfica referida à materialização original do SAD-69 e existe a necessidade de se lançar nesta base novas coordenadas que, no caso, estarão referidas à materialização do SAD-69 de 1996. Existem diferenças entre as duas materializações e em algumas partes da rede, essas diferenças não têm um comportamento sistemático e homogêneo, dificultando o estabelecimento de um procedimento para que possam ser estimadas. Além disso, essa nova rede faz parte de uma estrutura de alta precisão, e que pode não ser a utilizada como base de apoio a um determinado mapa. O SAD-69 (original) e o SAD-69 (materialização 1996), possuem a mesma definição. Suas coordenadas diferem somente devido às observações adicionais e às técnicas de ajustamento empregadas. Não existem parâmetros disponíveis para

transformar uma materialização em outra. As diferenças entre os dois conjuntos de coordenadas (denominadas de distorções), possuem valores que variam, no contexto nacional, em média, 4 metros, sendo que nos extremos sul e nordeste do país estes valores podem chegar a 15 metros.

De acordo com a Fundação IBGE (1996), o deslocamento horizontal das coordenadas aumenta proporcionalmente com a distância do ponto origem. Essas diferenças aparecem no mapa como um deslocamento, que será significativo conforme a sua escala e a sua localização geográfica. A Tabela 4.4, mostra os deslocamentos máximos (15m), apresentados em várias escalas de mapas, e mostra que os deslocamentos correspondentes aos deslocamentos máximos são desprezíveis até a escala de 1:50.000, onde passam a ser percebidos.

Tabela 4.4

Efeito das distorções em diferentes escalas considerando a distorção máxima de 15m, segundo a escala da carta.

ESCALA 1:	Deslocamento em mm
1.000.000	0.015
500.000	0.03
250.000	0.06
100.000	0.15
50.000	0.3
25.000	0.6
10.000	1.5
5.000	3.0
2.000	7.5
1.000	15.0

Fonte: IBGE, 2004.

Modelar essas distorções seria o objetivo principal para se estabelecer um relacionamento entre a antiga e a nova materialização. Procedimentos de modelagem destas distorções, devem ser analisados caso a caso, principalmente quando se tem levantamentos feitos com técnicas de posicionamento de alta precisão, vindo a melhorar a materialização existente. Quando se tem uma boa quantidade de estações aliadas a um comportamento sistemático, os resultados são satisfatórios. Quando as diferenças variam de forma randômica, como mostra a Figura 4.2, sua modelagem matemática se torna complexa e difícil.

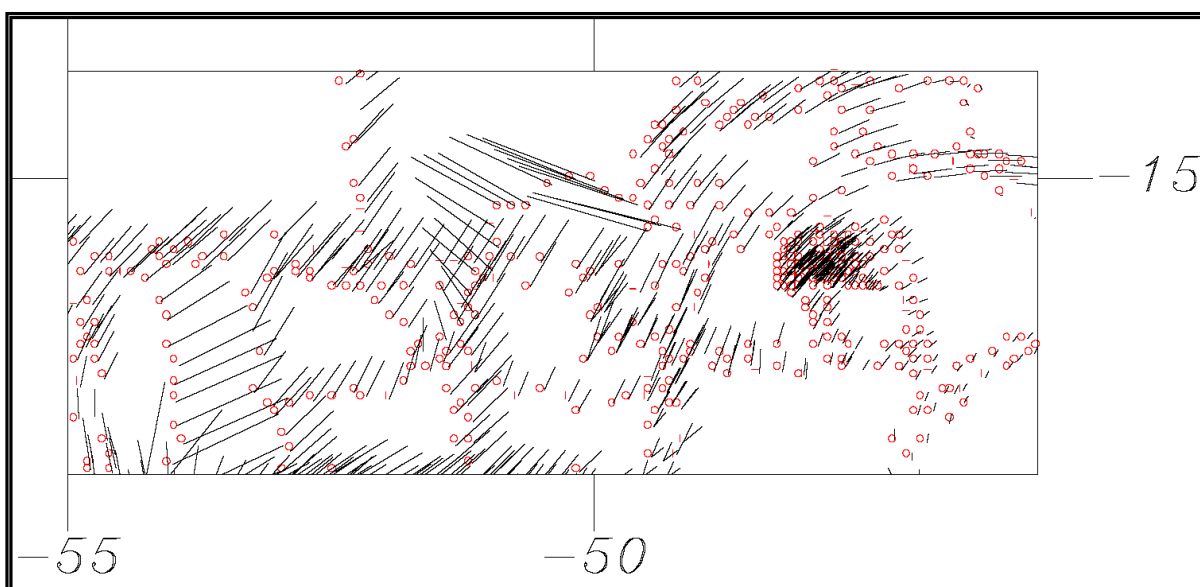


Figura 4.2 – Exemplo de distorção de tendência local randômica

Fonte: IBGE, 2004.