

A MEDIDA DO ARCO DE MERIDIANO E A DETERMINAÇÃO DA FORMA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Setembro de 2008

Original de:

Mario Ruiz Morales

Universidad de Granada, Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Campus de Fuentenueva.

Tradução:

Iran Carlos Stalliviere Corrêa

Museu de Topografia Prof. Laureano Ibrahim Chaffe

Departamento de Geodésia – Instituto de Geociências – UFRGS

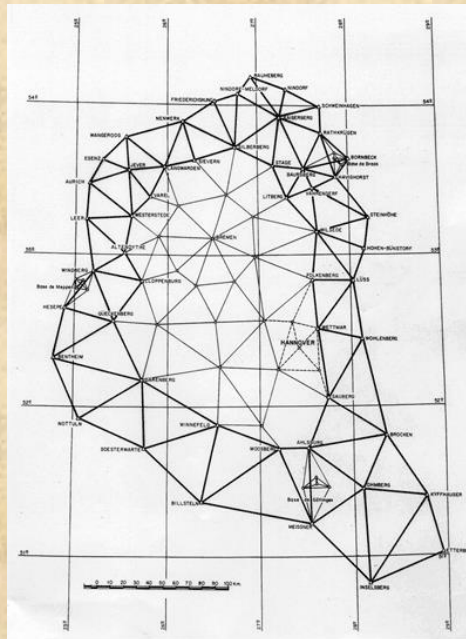
Porto Alegre-RS

O percurso histórico da geometria, em seu significado mais genuíno, teve início no Egito, pois segundo Heródoto, ali se inventou esse ramo das Ciências. Entretanto o estudo sistemático da mesma teve início na Grécia Clássica, onde os filósofos se perguntaram qual seria a forma e as dimensões da Terra. Estes chegaram a conclusão de que a mesma devia ser esférica. Iniciaram de imediato, a determinação de seu perímetro máximo, para o qual Eratóstenes é reconhecido como o fundador da geodésia pela determinação do comprimento da circunferência terrestre, é necessário ter presente que tanto antes como depois dele se efetuaram várias determinações semelhantes. Na Idade Média se produz um sério retrocesso no conhecimento geométrico, salvo alguns geodestas muçulmanos, tais como al-Biruni, que calculou o raio da Terra por um método realmente novo. No Renascimento se inicia a medir a Terra seguindo-se a metodologia estabelecida pelos gregos, ainda que se deva ressaltar a novidade introduzida por Snell ao calcular o comprimento do meridiano de Alkmaar, fazendo uso da triangulação, um procedimento que seria crucial para todas as operações geodésicas posteriores. A criação da Academia de Ciências de Paris e o encargo solicitado ao abade Picard, propiciou a determinação mais rigorosa do raio terrestre que se havia efetuado até então. Newton aproveitou tal medida para comprovar a validade de sua lei, ainda que propusesse um modelo terrestre ligeiramente diferente ao esférico: o elipsóide de revolução com achatamento polar. Constatada a variabilidade da curvatura terrestre por Cassini e questionado, por ele mesmo, o modelo newtoniano produz uma das controvérsias científicas mais sonhada da história. É sabido que tudo ficou esclarecido com as duas expedições auspiciadas pela Academia francesa: uma ao vice-reino do Peru (proposta por Godin) e outra a Lapônia (proposta por Maupertuis); com os resultados das mesmas se entra definitivamente na era elipsoidal, até que novamente se duvida de que seja essa a figura real da Terra. O defensor do novo modelo, mais físico que geométrico, foi o genial Gauss, ainda que o nome de geóide se deva a Listing, um de seus mais ilustres

discípulos. Essa superfície equipotencial do campo gravitacional terrestre, que coincide sensivelmente com o nível dos mares em repouso, é a forma real da Terra que se aceita na atualidade. Os principais parâmetros dessa nova superfície se conhece com grande exatidão, graças ao desenvolvimento incomparável da geodesia espacial, desde que fora lançado o primeiro satélite artificial pela então União Soviética. No trabalho que aqui se apresenta são desenvolvidas as etapas mais significativas de tão grande percurso, indicando os resultados das medições efetuadas por seus mais ilustres protagonistas.



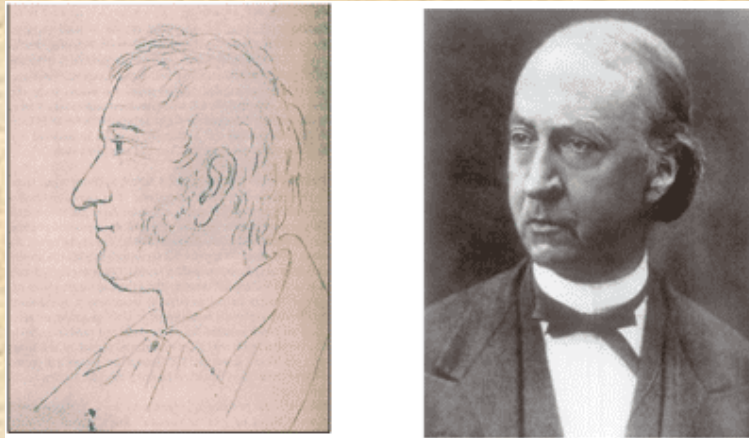
As obras de Diodoruse e de Estrabón



A rede geodésica de Hannover, com suas bases de Braak, Göttingen e Meppen. A primeira foi estabelecida por Schumacher e nela observaram conjuntamente Struve e Gauss durante o ano de 1820

A contribuição de Gauss à geodesia dinâmica foi igualmente importante, reconhecendo, no ano de 1828, igualmente o que havia feito antes Laplace (1802) e faria depois Bessel (1837), que o modelo elipsoidal não é válido quando se pretende obter uma grande exatidão. O que implica na necessidade de se considerar outra superfície que se ajuste melhor à forma real da Terra, já que na suposição de não se considerar os desvios da vertical, podem surgir incertezas nos cálculos dos

parâmetros elipsoidais, superiores à precisão das observações. A essa nova superfície se referia Gauss quando em sua publicação, "Determinação da diferença de latitude entre os Observatórios de Göttingen e Altona (1828)", afirmava que o que chamamos de superfície da Terra no sentido geométrico, não é mais que essa superfície que intercepta, em todos os lados, a direção da gravidade em ângulos retos, e parte da qual coincide com a superfície dos oceanos.



C. F. Gauss desenhado por Listing, o qual aparece fotografado. Listing foi um de seus brilhantes discípulos, tanto no estudo das matemáticas como no da física.

Esta seria a primeira e quem sabe a mais clara e sucinta definição do geóide, palavra, que como é sabido, proporia, anos depois (1873), seu aluno Johann Benedikt Listing (1808-1882), professor de Física da Universidade de Göttingen. O qual junto a Fischer e Bruns iniciou as teorias sobre a ondulação do geóide, fixando entre 800m e 1km a separação máxima entre ambas as superfícies; uma magnitude que não seria confiavelmente revisada até o desenvolvimento da geodesia espacial, no final do século passado (XX).

Outro dos astrônomos que efetuou a medida de um meridiano terrestre foi o alemão Heinrich Christian Schumacher (1780-1850), diretor do Observatório de Mannheim e da Triangulação Geodésica do condado de Holstein; à que logo agruparia a da Dinamarca, ainda que realmente fosse ultimada por Caspar Wesel. O arco de meridiano medido por Scumacher foi o compreendido entre Lauemburg e Lysabel, assinalando ao grau, um comprimento de 57.093 toesas. A ele se atribuiu a definição de um elipsóide com os seguintes parâmetros: $a = 6.376.804,37$ m e $f = 1/302,02$. Durante sua etapa de professor de Astronomia da Universidade de Copenhague, colaborou com seu amigo C. F. Gauss na realização de uma intersecção inversa, que pretendia localizar a estação chamada Holkensbastion. Os detalhes do método empregado por Gauss para resolver-la foram incluídos em uma carta que escreveu a Schumacher, os quais aparecem publicados no livro "Investigação sobre Temas de Geodésia Superior e Método dos Mínimos Quadrados"; a obra, de interesse histórico e científico, foi editada pelo Instituto Geográfico Nacional, no ano de 2002. Tanto o filho como o sobrinho de Schumacher se dedicaram à astronomia e à geodesia.



O astrônomo e geodesta H. Ch. Schumacher em sua etapa de professor na Universidade de Copenhague e capa do livro editado pelo Instituto Geográfico Nacional. Nele são traduzidas, ao espanhol, as lições geodésicas do sábio alemão e se encontra a intersecção inversa, que realizou junto com Scumacher.

Outra das figuras que contribuiu decisivamente ao protagonismo da geodesia alemã, foi o matemático Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), que, junto a seu discípulo Baeyer, mediu, entre os anos de 1831 e 1836, parte do meridiano de Trunz; encontrando para o comprimento do grau, da então denominada Prússia oriental, o equivalente a 57.144 toesas. A operação foi descrita em seu livro "Gradmessung in Ost-preussen und ihre Verbindung", publicado em 1838, chave para o posterior estudo da geodésia. Nele se detalha a rede de triangulação, entre Trunz e Memel, que permitiu enlaçar as redes de vários países europeus com a do Oriente da Rússia; para a medida das bases, empregou Bessel sua própria régua, resultando para a base de Königsberg um comprimento de 1.822 m.



O matemático Bessel e o astrônomo Repsold, construtor de instrumentos astronômicos de precisão.

O cálculo do desenvolvimento do arco lhe permitiu definir seu modelo elipsoidal em 1841, mediante as constantes $a = 6.377.397,155$ m e $f = 1/299,1528$; as quais foram empregadas, desde então, em numerosas representações cartográficas. Merece se destacar, como verdadeiramente notável, seu pêndulo, que mandou fabricar no afamado construtor e astrônomo Johann Georg Repsold (1770-1830); cuja principal inovação foi a introdução da correção necessária para que registrasse segundos. O pêndulo de Bessel se empregou, a partir de então, muito generalizadamente, para medições absolutas da gravidade, tal como recomendava a

AIG, todavia em 1864.

O arco medido por Bessel foi prolongado pelo general Johann Jakob Baeyer (1794-1885), o qual concebeu o projeto de uma rede geodésica que cobriu o Oriente da Prússia. O projeto foi desenvolvido e apresentado ao rei Federico Guillermo II no ano de 1851, por mediação de Humboldt. A rede se apoiava na cadeia do arco anterior e em outras que sucessivamente foram se realizando, chegando a ser o suporte no que se basearia um mapa da Prússia, a escala 1/100.000. Baeyer foi, ainda Diretor do Instituto Geodésico da Prússia, o primeiro presidente da Associação para a medição do Arco da Europa Central, criada em Berlim, graças à memória realizada pelo general um ano antes (1861), "Sobre o tamanho e forma da Terra, uma memória para a fundação de uma medição do arco da Europa Central".



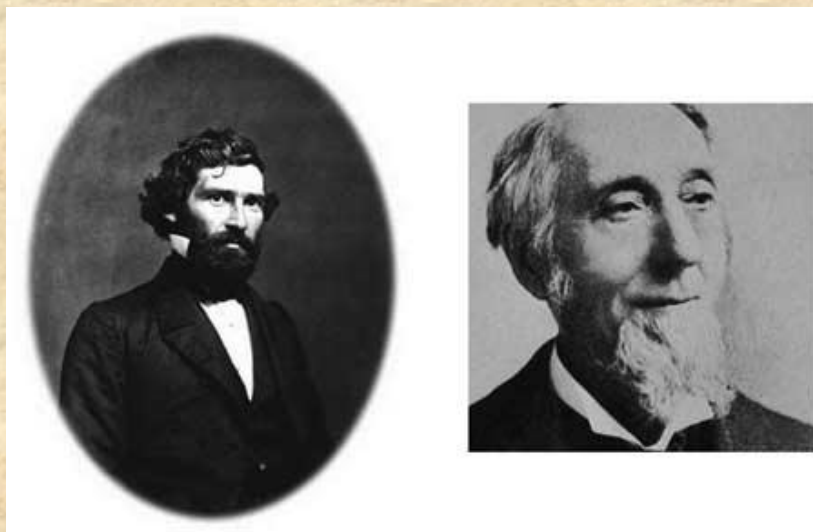
O astrônomo Baeyer, o principal defensor da internacionalização da geodésia.

Poucos anos depois se transformaria na "Associação para a Medição de Arcos de Meridiano e de Paralelo na Europa (1867), até chegar na "Associação Geodésica Internacional para a medição da Terra (1887)" o mais direto antecedente da atual União Geodésica e Geofísica Internacional, fundada em 1919. Tem que se fazer notar o prestígio alcançado pelo geodesta espanhol Carlos Ibáñez que presidiu a Associação Geodésica desde 1874 até sua morte, sendo reeleito sempre por unanimidade.

As medidas de Bessel e de Baeyer foram contemporâneas das realizadas pelo coronel francês J. B. Brousseau (1776-1840), sobre o paralelo Marennes (ao Norte de Bordeaux) e Istria. Combinando os valores obtidos de um de seus graus, com os do correspondente ao meridiano, que haviam sido obtidos por Delambre e Mechain, concluiu o geodesta que o achatamento mais provável que deveria assinalar-se ao elipsóide da França era da ordem de 1/247. Os resultados de sua medida se publicaram no ano de 1839, com o título "Mesure d'un arc du parallèle moyen, entre le pôle et l'équateur".

Uma das campanhas geodésicas mais sobressalentes do século XIX, foi indiscutidamente a associada à rede de triangulação que atravessou os EE.UU. de

Este a Oeste, até juntar os triângulos da zona do México com os canadenses. Assim se conseguiu medir o arco de paralelo de latitude 39° com uma amplitude longitudinal de $48^\circ 46'$, isto é superior a três horas, e com um comprimento próximo aos 4.224 km. O resultado se publicou em Washington no ano de 1900, dentro da memória intitulada "The Transcontinental Triangulation and the American Arc of the Parallel". Os trabalhos de campo duraram vinte e seis anos, medindo dez bases distribuídas ao longo da rede de triângulos, subdividida, por sua vez, em outras denominadas parciais.



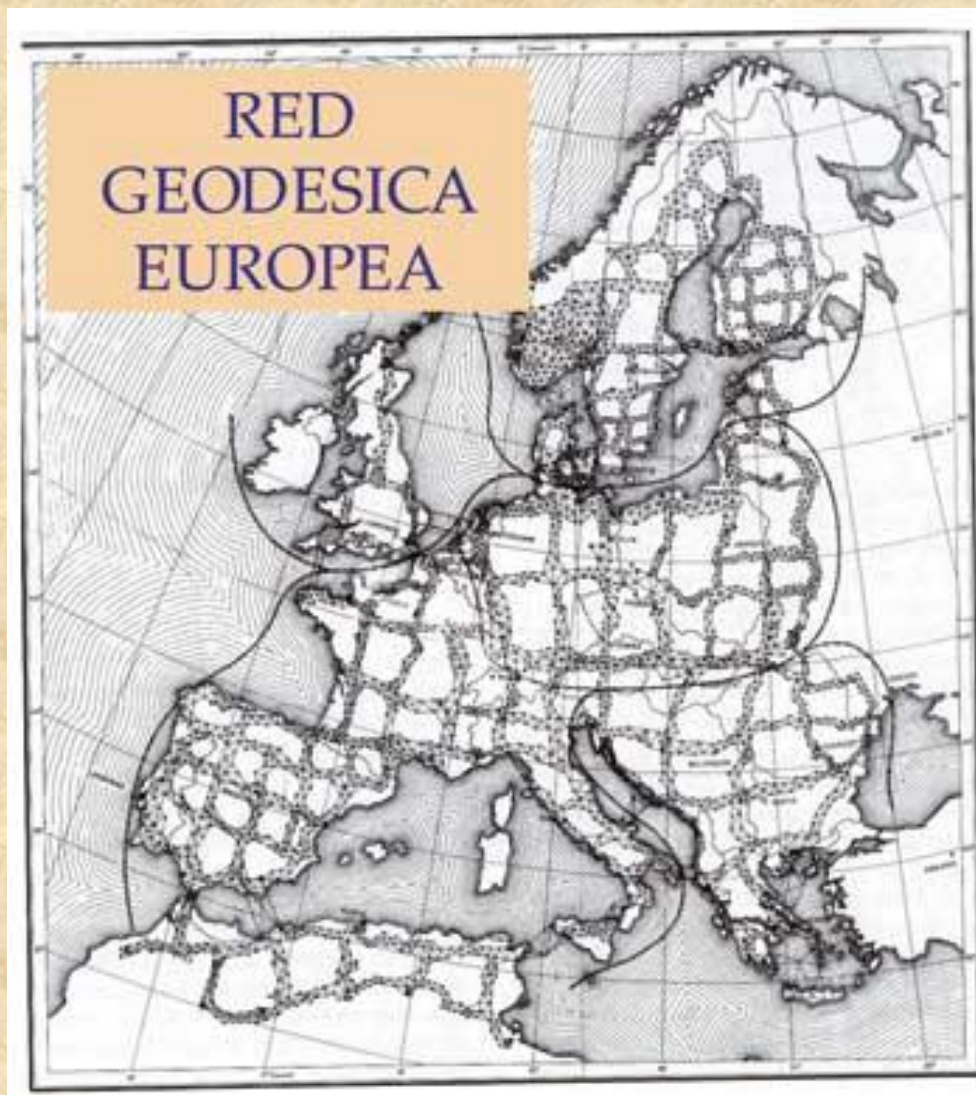
G. Davidson e Ch. A. Schott, dois geodestas europeus arraizados nos EE. UU.

As observações angulares se realizaram sobre heliográfios com dimensões variáveis, para amoldar-se ao comprimento das visadas, que resultaram ser surpreendentemente grandes. O maior protagonista das observações angulares foi o inglês Georg Davidson (1825-1905), sendo que o principal responsável dos cálculos foi o alemão Charles Anthony Schott (1826-1901).



Os Engenheiros Geógrafos franceses, em duas épocas diferentes

A rede francesa, o protótipo das realizadas no século XIX, se encomendou aos Engenheiros Geógrafos, ainda que as observações astronômicas e, especialmente, as de longitude fossem de competência dos membros do Bureau; como era previsível em seu desenho, se podia ver, todavia a influência das diretrizes de Picard.



As redes de triangulação ao longo dos meridianos e dos paralelos, seguindo o modelo defendido por J. Picard

O esboço se projetou traçando redes de triângulos paralelas às anteriores, a uma distância aproximada de 200 km, ficando assim formados os clássicos quadriláteros que posteriormente seriam cobertos por outros triângulos similares aos das redes principais; subdivididos depois em triângulos de segunda e terceira ordem.

Nas observações azimutais de primeira ordem, se realizou duas séries com 20 repetições no mínimo, finalizando as redes principais e o preenchimento dos quadriláteros no ano de 1844, idêntico número de séries, porém com 10 repetições, se realizariam nos de 2º ordem. Deve ser destacada a precaução tomada na medida das distâncias zenitais, para as quais se faziam três séries de medidas em diferentes horas, porém sobretudo ao meio-dia, procurando que as observações fossem simultâneas e acompanhadas de leituras barométricas. Nas ditas observações se empregaram os círculos repetidores, fabricados por Henri Prudence Gambey (1789-1847), membro do Bureau. A rede se apoiou sobre sete bases, as quais foram medidas com a régua de Borda. Tanto nas observações angulares como na medida das bases, se obteve a precisão possível de ser alcançar na época, melhorando os trabalhos prévios de Méchain.



H. P. Gambey e duas imagens de seu círculo repetidor.

As determinações astronômicas foram realizadas sobre quatorze estações de Laplace, situadas nas redes principais. O azimute foi obtido mediante observações à estrela Polar, nas proximidades de sua máxima digressão, e por observação ao Sol. As latitudes foram calculadas se observando as culminações da estrela Polar ou as de outras estrelas circumpolares. A obtenção da longitude continuava sendo problemática, apesar do avanço da cronometria, que somente era precisa para efeitos de navegação. Finalmente se empregou o sistema dos sinais de fogo, que já havia sido usado com êxito em ocasiões anteriores, com uma precisão menor de um segundo de tempo. Entretanto a solução definitiva ao famoso problema da determinação das longitudes, somente foi resolvido a partir do ano de 1838, em que Samuel Finley Breese Morse (1791-1872), já havia aperfeiçoado seu código.



O estadunidense S. F. B. Morse, inventor do código que leva seu nome, ainda que com a colaboração de Alfred Vail.

Todavia, por não estarem desenvolvidos os sistemas cartográficos conformes, não foi possível se obter as coordenadas geográficas dos vértices, mediante as cartesianas de suas imagens planas, foi necessário recorrer-se ao cálculo direto sobre

o elipsóide. Com tal critério foi resolvido o problema geodésico direto sobre a esfera local da região considerada, associada ao elipsóide de Delambre, podendo pois aplicar a trigonometria esférica e obter, finalmente, as coordenadas do novo vértice em função do progresso da geodésica e do azimute do alinhamento no vértice de partida. As simplificações introduzidas se traduziram em discordâncias de vários centésimos de segundo nas coordenadas obtidas, isto é, em vários decímetros na indeterminação da posição do vértice. Por outro lado, se dava também a grave circunstância de sua falta de homogeneidade por não estar compensada. O desenho e direção do projeto de execução se devem ao Oficial Superior do Corpo de Engenheiros Geógrafos Louis Puissant (1769-1843). Sua obra "Traité de Godésie, ou, Exposition des méthodes trigonométriques et astronomiques applicables soit à la mesure de la terre, soit à la confection des canevas des cartes et des plans topographiques"(Paris,1805), contempla a geodésia como uma disciplina com caráter próprio; de modo que serviu de modelo a seus sucessores, que ainda que atualizando os conteúdos técnicos, conservaram em troca, os métodos matemáticos originais.



O oficial superior do Corpo de Engenheiros Geógrafos L. Puissant.

No que se refere às altitudes dos vértices geodésicos, tem que se lembrar que nas instruções recebidas pelos Engenheiros Geógrafos, figuravam as relativas a observação das distâncias zenitais, tendo em conta as redes de distintas ordens. O nivelamento trigonométrico mais destacável da triangulação foi o referido a rede dos Pirineus, posto que, sua observação, a realizaram com toda a precaução, pensando que assim poderia se calcular corretamente o desnível existente entre os mares Cantábrico e Mediterrâneo. Na comunicação do Engenheiro Geógrafo Jean Baptiste Coraboeuf (1777-1859), a um dos operadores, afirma que o primeiro está 70 cm mais elevado que o segundo, quando se sabe, hoje em dia, que o desnível é da ordem de uns 30 cm.



A rede de triangulação dos Pirineus e seus enlaces com a rede da Espanha.

Também foi na França onde começou a solucionar-se o difícil problema da determinação da altitude, já que realmente a confiabilidade altimétrica esperada para o novo mapa, que se confeccionaria a partir da rede anterior, oscilava entre 1 e 2 m. De maneira que se evidenciou, com toda clareza, a conveniência de recorrer não só a outro procedimento de medida se não também a outro tipo de instrumentos, com os quais se poderiam conhecer, com maior exatidão, as altitudes ou desníveis de acordo com as necessidades associadas a muitos projetos de engenharia. O Tratado de nivelamento de Paul Emil Breton de Champ (1814-1885), cuja primeira edição foi de 1848, viria a solucionar o problema ao descrever a casuística do Nivelamento Geométrico, incluindo, naturalmente, o nível de luneta e o método do ponto médio, afirmando, por outra lado, que o erro esperado em um distância de 50 km, deve ser inferior aos 15 mm. Breton de Champ foi o principal impulsionador da Rede Nacional de Nivelamento, ainda que para sua execução, se encarregou Adrien Paul Bourdalouë (1798-1868). Em suas conclusões, publicadas em 1844 (Aperfeiçoamento do nível Egault e Construção de novas miras), explica sua preferência pelo novo nível construído por indicação do Engenheiro Auguste Egault des Noës e sobretudo pelas chamadas miras falantes, uma verdadeira inovação; anos mais tarde agregaria a placa base incrustada no terreno.



Folha de rosto do Tratado de Nivelamento de B. de Champ e um nível Egault.

A re-observação da Rede Geodésica Francesa foi iniciada por François Perrier (1833-1888), o melhor geodesta francês da última metade do século. Previamente havia podido constatar, com o motivo do novo enlace com a Inglaterra (1861), o pobre estado da geodésia na França, afirmando seu propósito de regenerá-la. Sua experiência geodésica foi adquirida, fundamentalmente, nos trabalhos que realizou no paralelo do Norte da Argélia, onde empregou o círculo azimutal que mandou construir

em Brunner.

Em 1870 começa o reconhecimento da nova rede francesa, ao Sul do meridiano França (no lado Canigou-Forceral), finalizando a observação de sua rede no ano de 1888. Sua experiência argelina seria de grande utilidade para o êxito do enlace continental que desenhou de acordo com Carlos Ibáñez. A obra científica do general Perrier, principalmente de aplicação, se deixou sentir durante muito tempo entre seus discípulos e colaboradores.



O general François Terrier, vice-diretor hispânico-argelino.

Perrier contou sempre com o apoio científico de Hervé Auguste Faye (1814-1902), o astrônomo francês que contribuiu também para que a geodésia francesa recobra-se parte de seu prestígio, nesta segunda metade do século. Faye foi um firme partidário de que se refizesse o meridiano da França e de que se continuasse a re-observação de sua rede geodésica. Assim mesmo, compreendeu a importância das medidas telegráficas de distância e a necessidade de fomentar a colaboração internacional, nas tarefas geodésicas, chegando a presidir a AIG desde 1892 até 1902.



O astrônomo H. Faye, Presidente da Associação Internacional de Geodésia, entre os anos de 1892 e 1902; foi o sucessor de Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero.

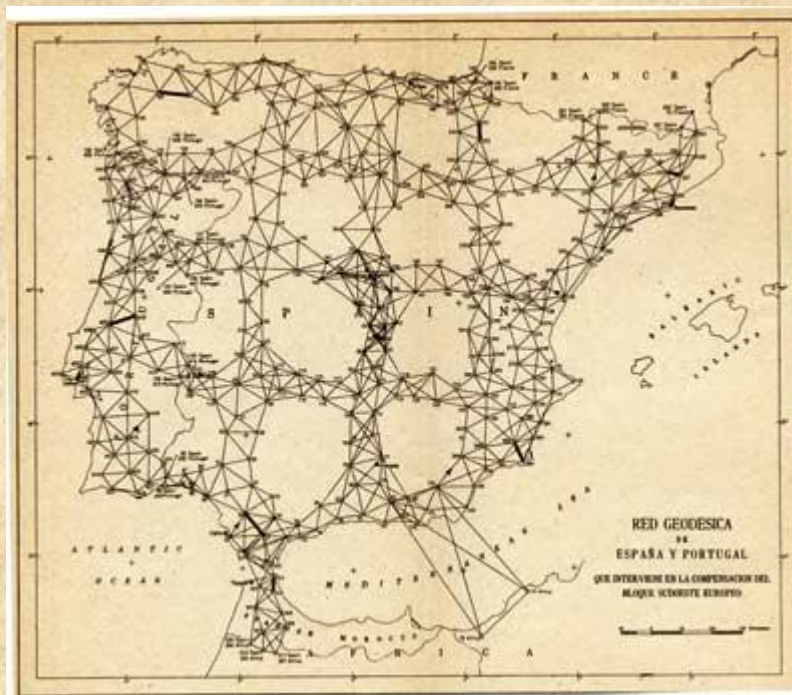
Não obstante, seu aporte mais valiosa á Geodésia, foi o que realizou, baseando-se nas hipóteses isostáticas de Pratt e Airy, explicando as anomalias gravimétricas de forma análoga a do fenômeno da isostasia; já que a atração da massa exterior ao geóide se compensa com o déficit de massa abaixo dos continentes. Esta dependência, do valor da gravidade com a altitude, faz com que se modifiquem os valores observados, para reduzi-los ou referir-los ao geóide. Também calculou H. Faye seu próprio elipsóide, utilizando a maioria dos arcos da época, manifestando que seus parâmetros eram $a = 3.272.562$ toesas, equivalentes a $6.378.343$ m, e $f = 1/294$.

Alguns anos mais tarde, em 1885, o matemático e físico, também professor de Mecânica Celeste na Universidade de Paris, Jules Henri Poincaré (1834-1912) demonstrou, por procedimentos astronômicos, que o achatamento terrestre não podia ser maior do que $1/297,3$, qualquer que fosse a lei de variação das densidades no interior da Terra. O resultado foi importante e impactante, pois apareceu em uma época em que se pretendia obter os parâmetros do elipsóide através das medidas de arco, e os diferentes organismos cartográficos haviam elegido vários modelos para calcular as triangulações de seus respectivos países. Dessa forma Poincaré se uniu aos investigadores que preconizavam a insuficiência do método geométrico dos arcos, por ser demasiado localista; fixando e predizendo o porvir pois todos os resultados posteriores confirmariam essa conclusão.



J. H. Poincaré, astrônomo e filósofo da ciência.

Outra das figuras indiscutíveis da geodésia do século XIX foi Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero (1825-1891), primeiro Diretor do Instituto Geográfico (1870) e primeiro Diretor do Instituto Geográfico e Estadístico (1873). Sua projeção internacional começou com a medição da base central de Madrideos, com a qual se ia dar escala à futura rede geodésica da Espanha peninsular.



A rede geodésica da Península Ibérica, observe que a mesma seguiu o modelo francês, ao estabelecer redes triangulares ao longo dos meridianos e dos paralelos.

Efetivamente, a medida havia despertado tanta expectativa na comunidade científica internacional que o governo francês chegou a enviar, como observador, o geodesta Aimé Laussedat (1819-1904), reconhecido depois como fundador da fotogrametria; com o tempo chegou a existir uma grande amizade entre os dois personagens. O êxito da medida de 1858 (na que intervieram também outros geodestas como Saavedra, Monet e Quiroga), foi tal que a Academia de Ciências Francesa a qualificou de memorável operação científica, a qual não podia ser superada. No ano seguinte se promulgo a Lei de Medição do Território, básica para impulsionar o projeto do Mapa Topográfico Nacional.



O general Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero, primeiro marques de Mulhacén

Foi precisamente durante a medição de Madridejos quando se decidiu abordar outro projeto ainda mais ambicioso, com o qual se ligaria, astronômica e geodesicamente, o continente europeu e o africano; seus diretores foram os dois operadores mais experientes dos dois países responsáveis, Carlos Ibáñez, por parte da Espanha e François Perrier, pelo lado da França. Entretanto, os estudos prévios não se realizaram antes de vinte anos, no verão de 1878. Para o desenvolvimento do projeto foram concretados os vértices do quadrilátero: Mulhacén e Tetica na Espanha, Filhaoussen e M'Sabiha na Argélia. As primeiras observações começaram em 27 de setembro de 1878, medindo, o geodesta espanhol Monet, o ângulo Tetica-Mulhacén-Filhaoussen, já no mês de outubro se pode observar M'Sabiha desde o vértice Tetica, nas tardes dos dias 13 e 18. Pela parte francesa se mediu, na Argélia, os ângulos correspondentes, terminando a campanha no dia 3 de novembro. O resultado obtido fez factível o projeto, de maneira que o governo espanhol convidou o seu homólogo francês para que participasse do mesmo, dizendo ambos, que Ibáñez e Perrier coordenassem o plano de trabalho.



Gráfico do enlace publicado nas Notas apresentadas por Carlos Ibáñez e Miguel Merino a Real Academia de Ciências Exatas, Físicas e Naturais, no ano de 1880.

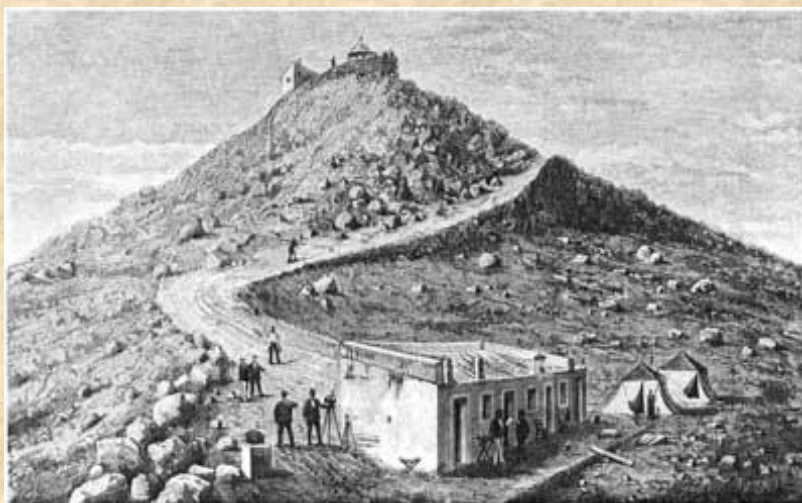
Em abril de 1879 foi nomeado o geodesta Joaquín Barraquer chefe da operação, designando-lhe o vértice Mulhacén, por sua especial dificuldade, para o qual foi auxiliado por Borrés e Cebrián. A observação do Tetica se encomendou aos geodestas López e Piñar. O encarregado da observação astronômica seria Miguel Merino, acompanhado de Antonio Esteban. A direção da equipe francesa recaiu sobre Perrier, que permaneceria em M'Sabiha, assistido por Derrien e Defforges. Em Filhaoussen o chefe da equipe seria Bassot, auxiliado por Sever e Koszutski. As expedições ficaram instaladas nos quatro vértices no dia 20 de agosto. As dificuldades meteorológicas tornaram impossíveis as observações, sendo algumas efetuadas até a noite do dia 9 de setembro, em que Perrier observou a luz do Tetica. A noite seguinte as quatro estações eram visíveis entre si. Com os naturais intervalos de mau tempo, se logrou medir todos os ângulos do quadrilátero e culminar com a ligação geodésica no dia 2 de outubro. Os ângulos somente puderam ser medidos graças aos sinais

luminosas noturnos, as visadas diurnas não foram possíveis em nenhum dia, confirmando assim a importância das recomendações formuladas nesse sentido por Monet ao finalizar os estudos prévios.



Acampamento instalado no vértice Mulhacén, a gravura apareceu publicada no número IX da revista madrilenha, La Ilustración Española y Americana (8/3/1880).

Análogo êxito, que o enlace geodésico, teve o astronômico, dirigido por Miguel Merino e Melchor (1831-1904), astrônomo do Observatório de Madri, e logo diretor do mesmo (1887); sendo a primeira vez que se fazia na Europa uma determinação direta da diferença de longitudes, em tais circunstâncias. Esta se calculou com base no intercâmbio regulado de sinais luminosas, entre M'Sabiha e a Tetica de Bacares, usando as fórmulas de Mayer e Bessel, para a redução das observações efetuadas as estrelas circumpolares. Para determinar a latitude, se observaram estrelas que culminavam a menos de 30° do zênite. Finalmente o azimute do lado Tetica-Gigante (outro vértice geodésico de primeira ordem), se calculou diretamente por meio das observações estelares citadas. A operação terminou no dia 16 de novembro de 1879. A satisfação da comunidade científica ficou refletida no seguinte comentário do ano de 1880: "Nossos geodestas e astrônomos realizaram, sem dúvida, o trabalho mais grandioso que registra a história das ciências, aplicado a Geografia Matemática, e Espanha e França podem se orgulharem da mais atrevida das medições terrestres".



Acampamento instalado na Tetica de Bacares (serra de Filabres), nas proximidades do atual Observatório hispânico-alemão de Calar Alto.

Na larga lista de astrônomos e geodestas há que se colocar também, ao escocês Charles Piazzi Smyth (1819-1900), diretor do Observatório de Edimburgo desde ano de 1845 até 1888, no qual se aposentou. Sua atividade geodésica havia iniciado uns anos antes, durante sua estada na Cidade do Cabo, ali participou na observação da triangulação que uniu o Observatório de La Caille com o telescópio, que havia sido instalado por J. Herschel, e colaborou na medição da base de Zwartland; tais trabalhos foram dirigidos por Sir Thomas Maclear, entre os anos de 1840 e 1848. Entretanto seu aporte mais singular teve lugar vinte anos depois de ser nomeado astrônomo real, quando se transferiu para o Egito, com o fim de analisar as chaves astronômicas, geodésicas e metrológicas da grande pirâmide de Khufú. A importância de suas pormenorizadas medições e o rigor com a que se realizaram foram reconhecidas de imediato pela "Royal Society of Edinburgh", que o recompensou com o prêmio Kizeen, no ano de 1867; todas suas investigações sobre a pirâmide, acompanhadas de numerosas ilustrações, se incluíram em "Edinburgh Observations. V. XIII".



Autorretrato de Ch. Piazzi Smyth e fotografia da grande pirâmide, realizada por ele mesmo durante a medição da mesma.

Entre suas especulações mais importantes cabem destacar as seguintes: a decimamilionésima parte do semi-eixo polar da Terra, multiplicada pelo número de dias do ano, era igual ao valor do lado da base piramidal, se a circunferência tipificada por tal base, simbolizasse o ano e se o raio da mesma coincidissem com a primitiva altura do monumento, dita linha deveria representar também a órbita média da Terra ao redor do Sol. Outra das questões geodésicas que abordou Piazzi Smyth foi a da orientação, chegando a conclusão de que o desvio era tão somente de $4'30''$; depois de achar o azimute dos quatro lados básicos, apoiando-se no que apresentou a Polar no momento de sua máxima digressão ocidental.

O resumo do século XIX termina com dois acontecimentos relevantes desde o ponto de vista geodésico, por uma parte se constata definitivamente que a latitude não era constante e por outra se descobre a liga INVAR, que melhoraria substancialmente as medidas de distâncias das triangulações. Foi a partir do ano de 1884 quando as determinações da latitude, realizadas em Berlim por Karl Friedrich Küstner (1856-1936), prova que a latitude do observatório sofria variações periódicas. As experiências se repetiriam entre 1891 e 1892, desde estações situadas em Berlim e Honolulu, com uma diferença de longitudes próxima aos 180° , constatando que as

variações de latitude encontradas eram concomitantes, enquanto uma diminuía a outra aumentava, o que se traduzia como não fixo o eixo de rotação terrestre. O fenômeno vinha a confirmar o previsto por Euler, tendo uma periodicidade complexa, compreendida em torno de 435 dias, em lugar dos 305 teóricos. A verdadeira natureza do fenômeno foi explicada, na mesma época, por Seth Carlo Chandler (1846-1913), um astrônomo norte-americano, que logrou determinar o período do movimento polar. No ano de 1899 se criou o Serviço Internacional de Latitudes, por decisão da União Geodésica Internacional, com a missão de estudar a **polodia**.



Os astrônomos K. F. Küstner e S. C. Chandler.

No ano de 1895, Jean René Beniot, diretor da Oficina Internacional de Pesos e Medidas, e seu adjunto Ch. Ed. Guillaume, publicaram "La Mesure rapide de bases géodésiques" na qual incluem seus estudos e experimentos com o metal que denominam invar (de invariável); uma liga de aço e níquel, ideal por seu preço, para construir cópias do metro padrão, mais barato que as de platina iridiada.

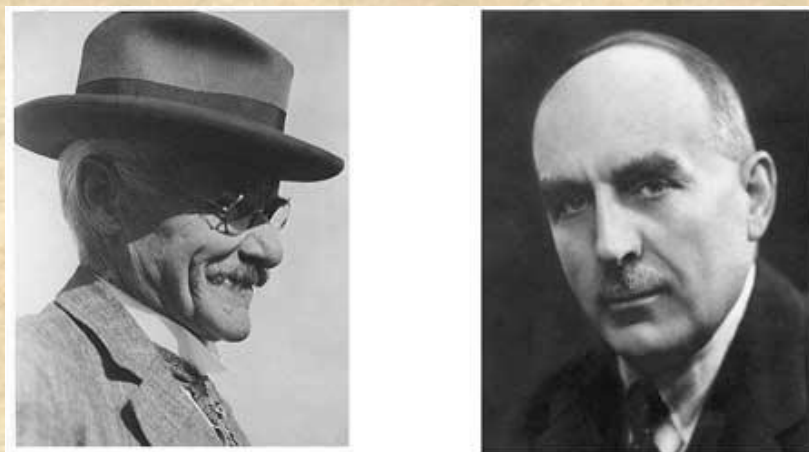


Ch. E. Guillaume.

Assinalavam que um aço a 36% de níquel tinha um coeficiente de dilatação muito baixo, menor que 10^{-6} por grau centígrado, uma característica que o fazia muito interessante para a medida de bases geodésicas. Ao suíço Charles Edouard Guillaume (1861-1936), se lhe concedeu o prêmio Nobel de Física, no ano de 1920, por seus contínuos trabalhos na Oficina Internacional de Pesos e Medidas, assim

como por seus inventos de grande utilidade prática.

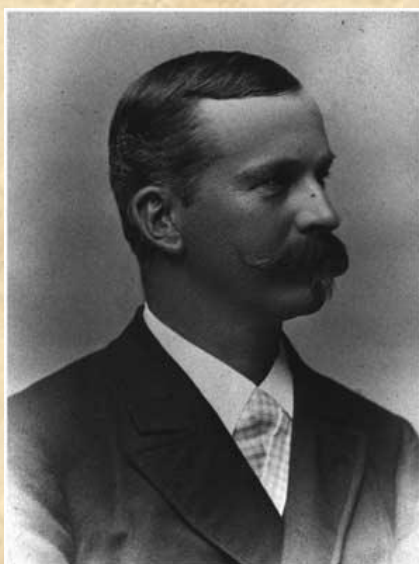
As contribuições contemporâneas, que indistintamente podem ser consideradas astronômicas ou geodésicas, são as referidas a criação dos instrumentos fotográficos zenitais, assim como as derivadas do emprego de geradores de freqüências, os quais revolucionaram a medida do tempo, com o aparecimento dos relógios de quartzo e atômicos. O Observatório Naval de Washington foi o primeiro em efetuar a transmissão, no ano de 1905. Em 1919 se criou o "Bureau International de l'Heure (BIH)" que fixou sua sede no Observatório de Paris. Os avanços produzidos na Mecânica Celeste confirmaram plenamente a falta de constância da velocidade de rotação terrestre, um fato já conhecido no final do século XVIII. Para isso se estudou pormenorizadamente o movimento da Lua, primeiro em 1919 por Ernest William Brown (1866-1938) e vinte anos depois por Harold Spencer Jones (1890-1960).



Os astrônomos E. W. Brown y H. S. Jones.

A partir das análises deste último, se comprovou que o dia solar aumenta constantemente de 164×10^{-5} segundos por século, devido basicamente ao roçamento das marés. Assim mesmo, Nicolas Stoyko descobriu em 1937 uma variação próxima ao milissegundo, em função da época do ano, uma vez estudadas os desvios entre o tempo solar médio e o determinado mediante os relógios de quartzo.

O resumo das etapas mais importantes da geodesia contemporânea deve começar, todavia, com as medições do grau que recomendou a Associação Internacional, coincidindo com sua criação: um arco polar, nas proximidades do arquipélago de Spitsbergen e de outro equatorial, na República do Equador. O primeiro deles se medio entre os anos de 1898 e 1902, resultando uma amplitude de $4^{\circ}10'$, com uma latitude média de $78^{\circ}43'$, encarregando-se as equipes russas da parte septentrional e os suecos da meridional. Os participantes que dirigiram a operação foram os professores: Backlund, diretor do Observatório de Pulkovo, Tcheryschew, membro da Academia de Ciências de San Petesburgo, E. Jäderin, professor da Escola Politécnica de Estocolmo e o astrônomo K. J. Ångström, cujo pai deu nome a unidade de comprimento que equivale a 10^{-10} metros.



O astrônomo e geodesta Johan Oskar Backlund (1846-1916)

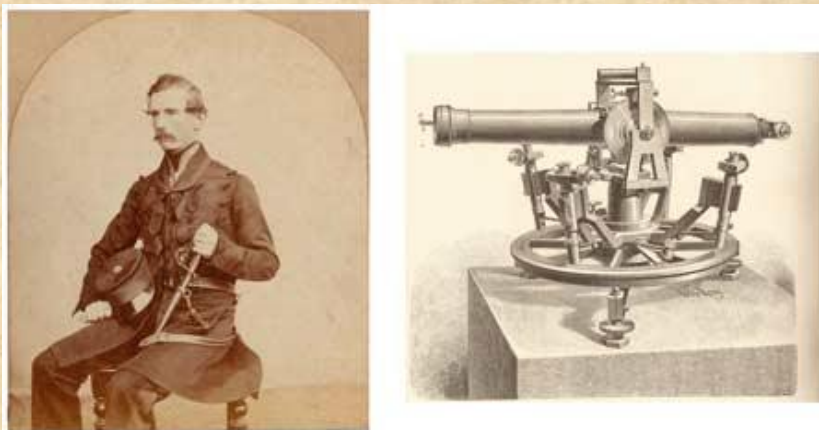
As bases foram medidas com o uso dos equipamentos de Jäderin, com fios invar de 25 metros, comprovando-se sua validade, ao medir outra base auxiliar, cujo comprimento havia sido achado com a régua de Struve. No que se refere as medidas angulares, temos que ressaltar que as péssimas condições meteorológicas da zona, impediram que se alcançasse precisões próprias de outros climas, não obstante, as imperfeições foram sanadas por um elevado número de observações. As observações das distâncias zenitais foram feitas quando as condições atmosféricas permitiram, os suecos instalaram um marégrafo, desenvolvido por Jäderin, para controlar os movimentos verticais do gelo, relacionado a um nivelamento de outra referência fundamental. Os russos calcularam a latitude e o azimute em 12 pontos, enquanto os suecos obtiveram a latitude em 17 pontos e mediram o azimute em 9 vértices. A triangulação se calculou sobre o elipsóide de Bessel, determinando-se os valores da gravidade em 11 estações.

Como sucedeu no século XVIII, a medida do arco polar foi acompanhada de outra equatorial, sendo que nesta ocasião a Associação decidiu que a amplitude fosse maior que 5° ou 6° e que se tomassem todas as precauções necessárias para que a medida alcançasse a precisão esperada para a época. A petição do governo francês, a Academia de Ciências emitiu um informe favorável, o qual foi apresentado por Henri Poincaré, confiando a execução do projeto ao Serviço Geográfico do Exército. A missão francesa, composta por quatro oficiais, quinze suboficiais e a correspondente tropa, além de 20.000 kilos de material de acampamento e todo o instrumental científico, chegou a Guayaquil em primeiro de junho de 1901, não finalizando a operação geodésica antes de 1907. Nela participaram geodestas tão ilustres e tão vinculados a Associação como Georges Perrier (1872-1946), filho de F. Perrier, e Charles Lallemand (1857-1938), principal artífice do nivelamento geral da França.



O general G. Perrier e o Engenheiro de Minas Ch. Lallemand, os dois responsáveis da segunda expedição francesa ao Equador.

A rede de triangulação alcançaria um comprimento de 6° desde o Sul da Colômbia ao Norte do Peru, centrando-se sobre o Equador e apoiando-se em três bases: Riobamba (centro), Viviate (sul) e São Gabriel (norte), que se mediram com trenas. A triangulação constou de 74 vértices, utilizando-se os círculos azimutais de Brunner para a medida dos ângulos e calculando-se sobre um dos elipsóides propostos por Alexander Ross Clarke (1828-1914).



O grande geodesta inglês A. R. Clarke, seus elipsóides cartográficos são ainda empregados atualmente, e um círculo azimutal construído em Paris por Brunner.

O desnível entre os vértices foi determinado mediante observações recíprocas efetuadas a partir de um estudo detalhado da refração atmosférica. Com o fim de estudar a variação da curvatura ao longo do arco, se avaliou a latitude em quase todos os vértices (60): de modo muito preciso em 10 estações principais (com o círculo meridiano) e com o astrolábio de prisma nas restantes. A comparação dessas latitudes astronômicas com as geodésicas calculadas, proporcionou o valor do desvio da vertical na direção do meridiano. Assim mesmo se estabeleceram três estações astronômicas fundamentais ou pontos de Laplace: Colômbia, Equador e Peru, a fim de calcular o azimute, a latitude e a longitude telegráfica. Também foram medidas seis determinações do valor da gravidade, recomendadas por Poincaré, empregando-se o pêndulo do general e geodesta Etienne Gilbert Defforges (1852-1915).

As medidas de arcos de meridiano terminaram com o projeto, que permitiu unir o Oceano Glacial Ártico com o Sul da África. Para isso, necessitou-se amarrar previamente a cidade do Cairo com a cidade do Cabo mediante a correspondente

triangulação, de forma que esse desenvolvimento, unido a rede da parte mais septentrional que passava por Creta, deu lugar a uma rede triangular estendida sobre uma amplitude meridional próxima aos 1.050. As medições terminaram no início da segunda metade do século, no ano de 1954, graças ao trabalho permanente dos membros do "Coast and Geodetic Survey" dos Estados Unidos. No projeto se aproveitaram grande parte das observações e triangulações realizadas anteriormente.

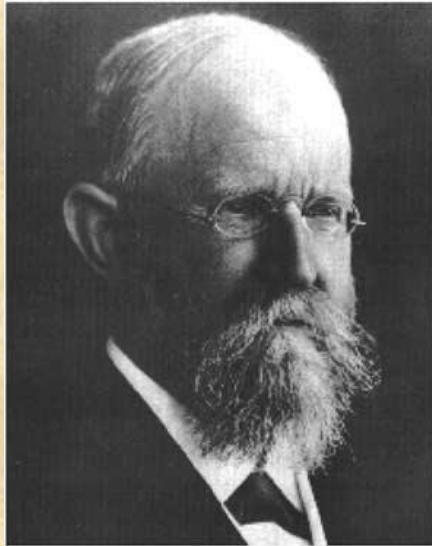


Em junho de 2004 se ergue em Buffelfontein (Sul da África) um monumento para comemorar a medida do grande arco africano

Ainda que as medidas anteriores contribuíssem, em maior ou menor proporção, o aparecimento de novos elipsóides não trouxeram novidade alguma em relação aos valores dos parâmetros previamente fixados: em torno de 6.738 km para o semi-eixo maior e uma magnitude compreendida entre $1/293$ e $1/300$ para o achatamento terrestre. Tendo em conta que os parâmetros dos modelos elipsóidicos eram diferentes e as discrepâncias não eram aceitáveis com os possíveis erros cometidos nas observações, se chegou a conclusão de que a forma da Terra só poderia ser elipsóidica, com certo grau de aproximação. Por outra parte se evidenciou a necessidade de recorrer a outra metodologia para encontrar um modelo de maior ajuste. É sabido que com o novo procedimento, a zona objeto de estudo, passou a ter certa extensão, cobrindo em certas ocasiões grandes superfícies, daí é que ficou conhecido como método das áreas (em contraposição com o método dos arcos) conseguindo-se assim os primeiros elipsóides realmente próximos ao geóide e por tanto uma representação fiel do mesmo; o método foi preconizado pelo alemão F. R. Helmert e levado a prática pelo norte-americano J. F. Hayford.

Os trabalhos de Friedrich Robert Helmert (1843-1917), tiveram lugar ao final do século XIX e começo do século XX, sendo um dos geodestas mais distinguidos dos tempos modernos. Ele definiu a Geodesia como a ciência da medida e representação da superfície terrestre, uma definição muito certa porém que hoje em dia convém complementar: O problema da Geodesia é determinar a forma e o campo de gravidade externa da Terra e de outros corpos celestes, em função do tempo; igual

que, determinar o elipsóide terrestre médio, a partir de observações realizadas sobre e externamente a superfície da Terra (Draheim 1971, Fischer 1975 a.).

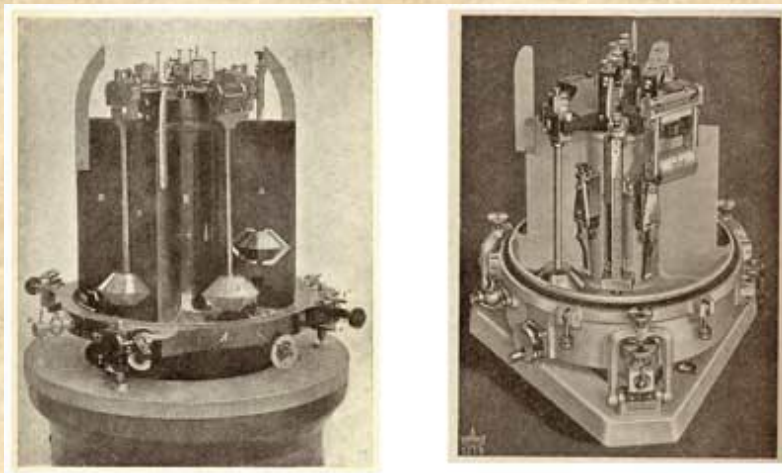


O grande geodesta alemão F. R. Helmert, Diretor do Instituto Geodésico Prussiano com sede em Postdam.

A Helmert se deve também a ideia de supor prolongado o geóide abaixo dos continentes e identificando-o como a forma matemática da Terra, quando decidiu estudá-lo, entre os anos de 1880 e 1884. Helmert introduziu a simplificação do chamado esferóide normal, truncando o desenvolvimento do potencial da gravidade que é a expressão analítica do geóide; a simplificação pode continuar se for adotado como modelo matemático, o elipsóide de revolução, denominado elipsóide terrestre pela proposta de Helmert.

Para definir esse elipsóide terrestre como a superfície matemática que melhor se adaptaria ao geóide, impôs Helmert as condições seguintes: ter o mesmo volume e eixo de rotação que o geóide, coincidir seu centro geométrico com o da gravidade da Terra e, por último, ser mínima a soma dos quadrados das distâncias entre cada um dos pontos da superfície do geóide e o correspondente ao elipsóide. Assim surgiu um método idealizado por ele (1880) para determinar o geóide e que se conhece com o nome de Nivelamento Astronômica ou Astro-geodésico, o qual permite obter perfis do mesmo e desenhá-lo mediante curvas de nível sobre o elipsóide. Este método de nivelamento foi aplicado pela primeira vez na região alemã de Harz sob a direção de Helmert, o qual demonstraria, no ano de 1899, que as repetidas ondulações do geóide com relação ao elipsóide, eram menores que 100m.

Os trabalhos gravimétricos realizados por Helmert aparecem, no início, associados a figura do general austríaco Robert Daublebsky von Sterneck (1839-1910) e as numerosas medidas da gravidade que efetuou com seu próprio pêndulo, nos Alpes tiroleses. Os cálculos de Helmert, fazendo intervir os dados de 37 estações situadas ao longo de uma linha de 356 km, tiveram grande repercussão quando apareceram publicados, em 1892, "Die Schwerkraft im Hochgebirge insbesondere, in den Tyroler Alpen, in geodätischer und geologischer Beziehung. A.I.G. Berlín, 1890", já que se voltava a evidenciar os déficit maciços observados anos atrás por Pratt.



Equipamento pendular de R. von Sterneck e uma modificação posterior, construída pela casa Askania.

A justificativa do fenômeno, dada por Helmert, era análoga a defendida por C. Dutton (o ante-país se rebaixa e as montanhas se elevam). O processo designado pelo geólogo americano com o nome de isostasia, encontrou uma acolhida muito favorável, sobre tudo nos Estados Unidos, influenciada, quem sabe, pelos trabalhos que publicou sobre o fato, J. F. Hayford: "The Geodetic Evidence of Isostasy (1906), The Earth a Failing structure (1907) e The relation of Isostasy to Geodesy, Geophysics and Geology (1911)".



O capitão Clarence Edward Dutton (1841-1912) e um dos desenhos panorâmicos que fez do Gran Canyon do Colorado.

Helmert foi também, em 1901, um dos primeiros geodestas em aplicar as relações de Clairaut para determinar gravimetricamente o elipsóide, utilizando para tal fim múltiplas observações, ao redor de 1.500 valores da gravidade, previamente corrigidos pela redução ao ar livre. Assim deduziu para a gravidade e para o achatamento polar os seguintes valores:

$$g = 978,046(1+0,005302 \text{ sen}^2 j -0,000007 \text{ sen}^2 2 j) \text{ gals,}$$

$$a=1/298,3,$$

ainda que em sua publicação "Neue Formeln für den Verlauf der Schwerkraft im Meeresniveau beim Festlande. 1915", retificou ambos para:

$$g = 978,052(1+0,005285 \text{ sen}^2 j -0,000007 \text{ sen}^2 2j) \text{ gals,}$$

$$a=1/296,7.$$

Os estudos geodésicos de Helmert se referiram a determinação dos parâmetros do elipsóide mediante métodos astronômicos, baseando-se nas perturbações do movimento da Lua, em latitude e longitude, obteve para o achatamento o valor de $1/298,8 \pm 2,2$. Observa-se que através da medida da paralaxe lunar, e suposto um valor dado para o citado achatamento, pode-se calcular o semi-eixo maior do elipsóide; com tal procedimento, obteve Helmert, os seguintes valores:

$$a = 6.378.830 \text{ metros, com } f = 1/299,26$$

$$a = 6.381.360 \text{ metros, com } f = 1/289,76$$

É lógico que Helmert analisou também o método dos arcos para encontrar os parâmetros elipsóidicos, demonstrando, com suas investigações, que o semi-eixo encontrado por Bessel parecia demasiado pequeno, enquanto o achatamento obtido por Clarke resultava demasiado grande. Os resultados achados por ele em 1907 foram:

$$a = 6.378.200 \text{ e } f = 1/298,3$$

se bem que o achatamento o retificaria no ano de 1915, atendendo a mais e modernas observações. Quanto a magnitude do raio equatorial, também o modificou nessas mesmas datas, em função da média dos seis, obtidos pelas medidas de arcos realizadas na Europa, Ásia e África, chegando assim ao valor.

Se bem que o método astronômico-geodésico das áreas fora idealizado por Helmert, sua primeira realização prática se deve ao engenheiro civil e geodesta norte-americano John Fillmore Hayford (1868-1925), que elegeu o elipsóide mais provável para a zona objeto de estudo. As medidas nas que se apoiou, foram as que serviram para estabelecer as redes geodésicas e astronômicas dos Estados Unidos, cujos cálculos se realizaram a partir do Datum situado em Kansas: Meades Ranch ($\varphi = 39^{\circ}13'26",686 \text{ N}$, $\lambda = 98^{\circ}32'30",506 \text{ WG}$). O azimute do lado Meades Ranch-Waldo é de $65^{\circ}28'9",64$, empregando o elipsóide de Clarke (1866), por proposta do Inspetor dos trabalhos geodésicos e Chefe da Divisão de Cálculo, o próprio Hayford (1901). No final do processo havia que calcular os valores mais prováveis, não só do semi-eixo maior e do achatamento do elipsóide, se não também da profundidade da superfície de compensação isostática.



O geodesta americano J. F. Hayford.

Uma vez determinada as diversas profundidades de compensação para comprovar experimentalmente qual das diferentes estruturas satisfazia melhor a totalidade do sistema de equações, se aceitou como valor mais provável uma profundidade de 113,7 km. O algoritmo de cálculo empregado foi o dos mínimos quadrados, publicando-se os primeiros resultados no ano de 1909, com o título "Figure of the Earth and isostasy from measurement in the United States (Washington, 1909)" e os complementários, um ano mais tarde, "Supplementary investigation in 1909 of the Figure of the Earth and Isostasy". O resultado de cálculos tão laboriosos (sem o auxílio da informática ou de calculadoras científicas) é:

Semi-eixo maior ou raio equatorial.....	6.378.388 ±18m
Inverso do achatamento.....	297,0 ±0,5
Semi-eixo menor ou raio polar.....	6.356909m

Hayford teve em William Bowie (1872-1942) um grande colaborador no impulsor principal das campanhas gravimétricas, terrestres e marítimas. Dessa forma recopilou numerosas observações que demonstravam a correlação entre as anomalias da gravidade e os diferentes aspectos do relevo topográfico, validando por tanto a isostasia como um fenômeno geológico. Junto a Hayford, calculou as tabelas que permitiam achar a profundidade de compensação isostática, as quais aparecem nas memórias que apresentaram em 1912: "The effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity". Por outro lado, ambos geodestas, colaboraram na determinação gravimétrica do achatamento terrestre, chegando aos valores seguintes: 1/298,4 (1912) e 1/297,4 (1917).



O geodesta americano W. Bowie, Presidente da Associação Internacional de Geodésia, entre 1919 e 1933.

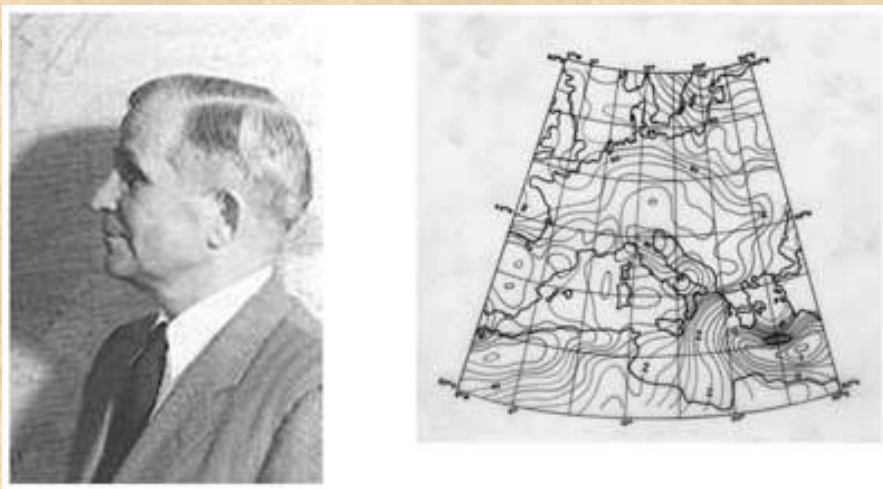
Não é muito conhecido, o feito de que o citado elipsóide de Hayford passou a denominar-se internacional através da resolução tomada pelo Comitê Executivo da Seção de Geodésia da União Geodésica e Geofísica Internacional, reunido em Madri no dia 24 de setembro de 1924, poucos dias antes de celebrar-se ali, a segunda assembléia geral. A reunião se realizou em Madri, atendendo a recomendação que fez o Engenheiro Geógrafo espanhol José Galbis Rodríguez (1868-1952), que contava com a autorização expressa do Diretor Geral do Instituto Geográfico e Estatístico. As sessões da Assembléia, propriamente dita, tiveram lugar entre os dias 1 e 8 de outubro no Salão do Congresso dos Deputados, cedido pelo Governo, a pedido do próprio Galbis.



O general e Engenheiro Geógrafo J. Galbis e o cartaz anunciando a Assembleia internacional. Galbis criou o Corpo de Meteorologistas do Estado e confeccionou o primeiro catálogo sísmico da Espanha.

A metodologia de Hayford foi seguida, em anos sucessivos, por outros geodestas. Assim procederia Wiekko Alexanteri Heiskanen (1895-1971), que analisando os dados europeus e os procedentes dos Estados Unidos, fez um importante trabalho de sínteses, entre os anos de 1925 e 1935; assim pode propor novos modelos elipsoidais, que melhoravam os anteriores. De igual importância foi sua determinação gravimétrica do Geóide, durante sua estada na Universidade Estatal de Ohio, fruto de um projeto de investigação realizado entre os anos de 1950 e 1957, apoiando-se nos dados proporcionados por numerosas medidas da gravidade. O

resultado foi publicado no ano de 1957 com o nome de Geóide de Columbus, referido somente ao hemisfério Norte e construído sobre o elipsóide de Hayford, com uma eqüidistância de dois metros entre as curvas de nível. Outros resultados de seu programa foram que o achatamento terrestre no hemisfério Norte era menor que no Sul, um fenômeno que seria confirmado mais tarde pela Geodesia espacial.



W. A. Heiskanen, um geodesta finlandês com vínculos nos EE. UU., e um fragmento de seu modelo geoidal; dirigiu o Instituto Geodésico de seu país entre 1949 e 1961.

Outro dos geodestas que empregou o método das áreas para estudar a forma e dimensões do elipsóide terrestre mais provável, foi o russo Theodosy Nicolaievitch Krasovsky (1878-1948). Para isso utilizou as medidas realizadas na extensa rede geodésica e de estações astronômicas existente na desaparecida URSS, disponíveis até o ano de 1930. Sua primeira conclusão de que o elipsóide de Bessel, que se vinha usando até então, não era o que melhor se ajustava a zona estudada, pelo motivo de possuir um semi-eixo equatorial demasiado pequeno, o qual foi plenamente ratificado pelos estudos posteriores que determinaram a discrepância em torno dos 850 m. Estes estudos foram dirigidos por Krasovsky e realizados por membros do Instituto Superior de Engenheiros Geodestas, Aerofotogramétricos e Cartógrafos de Moscou, destacando sobre todos, o grande trabalho do Engenheiro A. A. Izótov.



O geodesta russo T. N. Krasovsky.

O programa se efetuou durante dez anos, recomendando-se, em 1940, um novo elipsóide para a URSS, que foi aprovado pelo Conselho de Ministros em 7 de abril de 1946, indicando-se o nome de Krasovsky e identificando-o pelos parâmetros:

$$\text{Semi-eixo maior ou eixo equatorial} = 6.378.345 \pm 60 \text{ m}$$

$$\text{Achatamento} = 1/298,3$$

Foi esta a determinação mais exata realizada até então, ao haver feito intervir, pela primeira vez na mesma, os dados das triangulações e os da também extensa rede gravimétrica, além de incluir observações da Europa Ocidental e dos Estados Unidos.

Dessa forma, a zona objeto de estudo alcançou os 20 milhões de quilômetros quadrados aproximadamente. Sua triangulação, em grande parte posterior a 1930, se realizou de acordo com a nova normativa internacional, com densidades de bases e estações astronômicas a cada 100km, nas quais se determinou o desvio da vertical mediante os dados gravimétricos. Convém salientar que o valor achado para o achatamento, coincide com o que se aceita atualmente, uma vez analisados os dados gravimétricos mais completos (terrestres e marítimos) e os proporcionados pelas observações relacionadas com os satélites artificiais. Krasovsky foi por tanto o principal impulsor do denominado nivelamento astro-gravimétrico, que seria aperfeiçoado por M. S. Molodensky para poder determinar diretamente a forma da superfície física da Terra e de seu campo gravitacional externo. O elipsóide de Krasovsky, foi o modelo matemático que se representou na cartografia básica de todos os países submetido à influência soviética.

As investigações do russo Mikhail Sergeevich Molodensky (1909-1991), no campo das altitudes, lhe permitiram demonstrar que se a altitude geométrica se expressava como soma da ortométrica e da ondulação do geóide, não poderia calcular-se nenhum deles de forma rigorosa, sem haver adotado uma hipótese sobre a estrutura interna da Terra. Se pelo contrário, se fizesse igual à soma da altitude normal e da chamada anomalia da altitude, se poderia obter com toda exatidão. Molodensky introduziu o termo quase-geóide para referir-se a uma superfície que dista do elipsóide de uma magnitude igual à citada anomalia. A metodologia imposta por Molodensky até 1945, foi posta a prova por seus discípulos do Instituto Nacional de Geodesia, Fotogrametria e Cartografia da URSS, culminando assim uma obra mestra, que retificou todos os conceitos básicos da geodésia, ao tempo que a dotava de uma formulação matemática mais rigorosa.



O geodesta M. S. Molodensky.

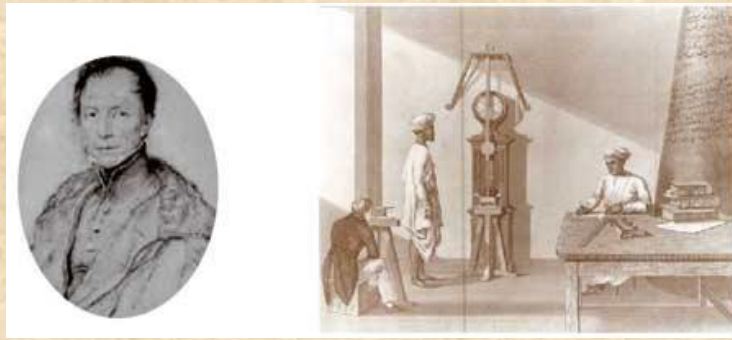
Mais tarde, entre 1960 e 1961, o geodesta finlandês Reino Antero Hirvonen (1908-1989), incluiu o vocábulo *Teluroide* para identificar a superfície que dista do elipsóide, de uma quantidade igual ao valor da altitude normal; a ele se deve também a aplicação, pela primeira vez, da fórmula do inglês George Gabriel Stokes (1819-1903), para calcular o geóide gravimétrico, após medir a gravidade em 186 estações, entre os anos de 1824 e 1937. A continua realização de observações gravimétricas que se vêm comentando nos anos transcorridos deste século XX, são provas do desenvolvimento e consolidação da gravimétrica, assim como de sua contribuição ao melhor conhecimento da forma da Terra. Dois foram os métodos empregados para medir a aceleração da gravidade, proporcionando em um caso medições absolutas da mesma e relativas no outro. O método mais atual para calcular dito valor absoluto é o da caída livre, ainda que se tenha que vencer muitas dificuldades se a precisão requerida é elevada.



O geodesta R. A. Hirvonen, no Departamento de Física da Universidade de Helsinki.

Convém lembrar o método pendular para determinar o valor absoluto da gravidade, o qual se baseava na medida prévia do comprimento do pêndulo e da correta obtenção do período de oscilação; devem destacar-se como variantes do método as introduzidas por Bessel, nas medidas que efetuou em Königsberg e Berlim no ano de 1835, e sobre tudo as de Henry Kater (1777-1835), que com seu pêndulo reversível, construído no ano de 1815, determinou o valor absoluto da gravidade para

Londres.



O capitão H. Kater e um experimento com seu pêndulo em Madras, ao Sudeste da Índia

Kater fez ainda observações gravimétricas sobre os principais vértices da rede geodésica da Gran Bretanha, com o fim de calcular a variação do comprimento de um pêndulo que batia segundos. A comunicação correspondente o levou ante a "Royal Society of London", no mês de junho de 1819, sendo incluído depois em seus "Philosophical Transactions".

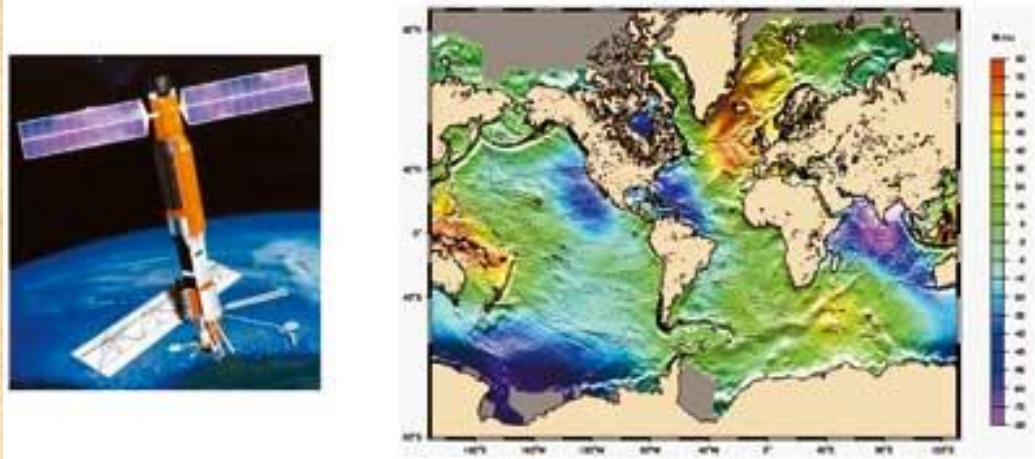
A importância da gravimetria, para o conhecimento da forma da Terra, era tal a essas alturas do século XX, que um grupo seletivo de geodestas propôs a necessidade de efetuar um levantamento gravimétrico de caráter global, entretanto essa recomendação se viu dramaticamente postergada pela segunda guerra mundial. Um deles foi o holandês Félix Andries Vening-Meinesz (1887-1966), cuja contribuição mais conhecida e sobressalente, no domínio da Gravimetria, foi a de um instrumento e uma metodologia que permitiram obter determinações gravimétricas precisas no mar, prestando desse modo a Geodésia um serviço inapreciável, pois até então só se falava de geóide e elipsóide terrestres.

No ano de 1974, surgiu a altimetria por satélite como um novo método da geodesia espacial, coincidindo com a colocação em órbita do satélite GEOS 3 ("Geodynamics Experimental Ocean Satellite"); o satélite, com radar incorporado, foi lançado em 10 de abril de 1975, alcançando uma órbita com uma inclinação de 115° e uma altitude de 818 km em seu perigeo e 858 km em seu apogeu.



O satélite GEOS 3, da NASA, foi construído como parte do programa EOPAP (Earth and Ocean Physics Applications Program).

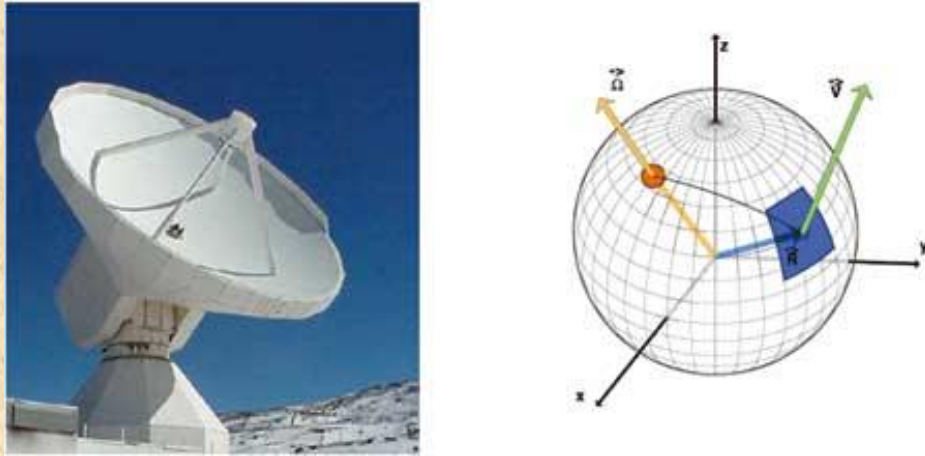
Assim pode-se medir o tempo mínimo necessário para que uma onda emitida pelo satélite se refletisse na superfície oceânica e regressasse de novo a seu ponto de partida, e em consequência calcular a altitude do satélite sobre o mar multiplicando a metade do tempo invertido, pela velocidade das ondas eletromagnéticas. Como a cadência da onda emitida pelo radar é muito elevada se pode medir milhares de distâncias da trajetória ao oceano, sempre em função dos parâmetros que definem a órbita do satélite e a forma do oceano (aproximadamente a mesma do geóide).



O satélite Seasat 1 e um geóide marinho (AVISO), formado em Toulouse.

A precisão destas medidas altimétricas passou dos 2 metros do GEOS 3 ao decímetro no SEASAT 1 (1978). Logicamente a análises dos resultados obtidos por este nivelamento espacial tem sido de grande utilidade para conhecer o geóide marinho, com menos incertezas que o terrestre.

Tem, por último, outras duas áreas em continuo desenvolvimento, desde sua aparição nos anos 80, sobre as que se apóia hoje em dia a Geodésia espacial, se trata da radio-interferometria de grande base ("Very Long Base Inter-ferometry") e da metodologia do posicionamento moderno, da qual é o GPS ("Global Positioning System"), seu máximo expoente. O princípio da primeira é o seguinte: Dois radiotelescópios distantes vários milhares de kilometros, observam simultaneamente uma radio fonte de suficiente intensidade e quase pontual, uma vez analisada a radiação recebida e comparando as fases, se pode determinar a direção da fonte com relação à base formada pelos radiotelescópios; ao proceder ao inverso, quer dizer, conhecendo a posição relativa das fontes pode-se determinar a direção e o comprimento da base. A interferometria se baseia nos grandes radiotelescópios, atualmente instalados e com meios de cálculos muito potentes; uma de suas aplicações mais sobressalentes é a quantificação rigorosa dos deslocamentos diferenciais das placas litosféricas.

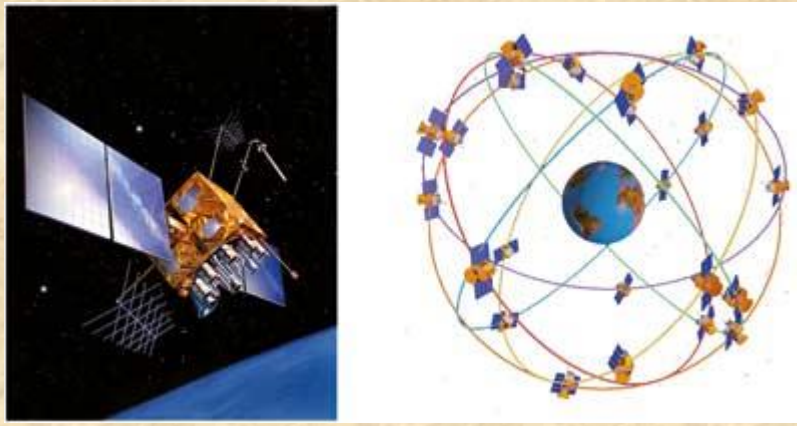


Radiotelescópio IRAM-IGN de Sierra Nevada e esquema do movimento de uma placa tectônica ao redor de seu polo de rotação. O IRAM (Instituto de Radioastronomia Milimétrica) é um Organismo com participação alemã, espanhola e francesa; o IGN (Instituto Geográfico Nacional) representa o Governo espanhol.

LAS VELOCIDADES ANUALES DE LAS PLACAS TECTONICAS			
1	PACIFICO	10cm/a	hacia el Noroeste
2	EUROASIATICA	10cm/a	hacia el Este
3	AFRICA	2cm/a	hacia el Norte
4	ANTARTICA	Gira sobre si misma	
5	INDIA-AUSTRALIA	2cm/a	hacia el Norte
6	AMERICA DEL NORTE	1cm/a	hacia el Oeste
7	AMERICA DEL SUR	1cm/a	hacia el Norte
8	NAZCA	7cm/a	hacia el Este
9	FILIPINAS	7cm/a	hacia el Oeste
10	ARABIA	3cm/a	hacia el Noreste
11	COCO	5cm/a	hacia el Noreste
12	CARIBE	1cm/a	hacia el Noreste

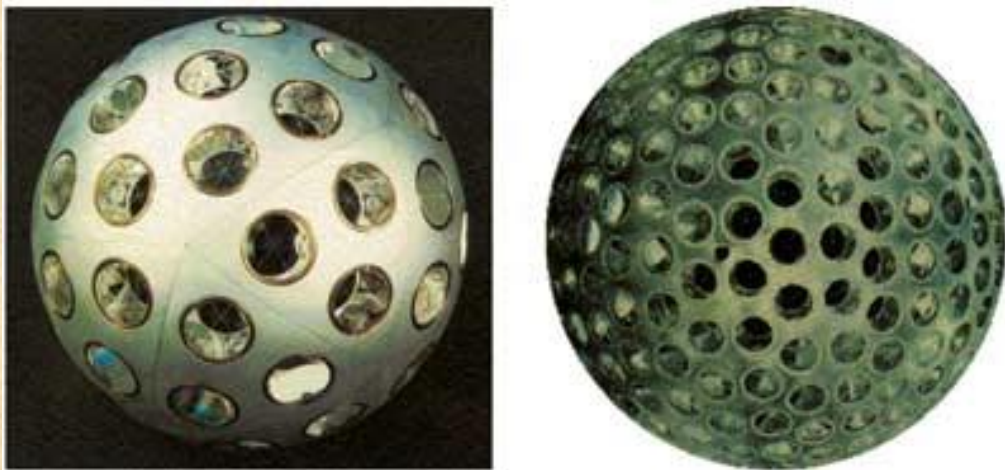
Dados proporcionados pelo CNES ("Centre National d'Etudes Spatiales").

Uma vez superada a geodésia espacial geométrica pela dinâmica, são os métodos desta os essencialmente utilizados na prática cotidiana, entre eles pode-se estabelecer certa distinção, em função dos parâmetros que se pretende determinar. Além dos grandes programas globais associados à obtenção de um sistema geodésico, se utilizam também os métodos dinâmicos para calcular a posição de estações terrestres, supondo-se conhecido o campo de gravidade da Terra e freqüentemente, como ocorre nos sistemas de navegação por satélite, os parâmetros orbitais, os quais são transmitidos ao usuário desde o satélite. É sabido que o sistema de posicionamento de maior difusão é o GPS, criado no Departamento de Defesa dos EE.UU. Uma de suas aplicações mais fundamental está relacionada com o problema da rotação terrestre: supondo-se conhecidas as posições de uma série de pontos, se trata de analisar seu deslocamento global; outros de seus objetivos são determinar a **polodia** e as irregularidades da própria velocidade da Terra.



Satélite GPS e esquema da constelação em que se integra.

Os princípios da geodésia espacial, que acabamos de comentar, não estão referidos a um determinado instrumento, unicamente pode-se considerar excepcional a altimetria em que, necessariamente, se utiliza a superfície oceânica como referência ou como objeto de estudo. A telemetria laser tem melhorado consideravelmente seus resultados nos últimos anos, as incertezas métricas iniciais se transformaram agora em centimétricas.



Os satélites Starlette (I) e o Lageos (D). O primeiro tinha um diâmetro de 24 cm e 60 refletores laser, o segundo era muito maior: 60 cm de diâmetro e 426 prismas.

Os satélites Starlette, lançado pela França em 1975, e Lageos ("Laser Geodynamics Satellite"), posto em órbita pelos USA em 1976, são dois alvos ideais por tratar-se de esferas muito densas, cobertas por pequenos prismas de vidro retro-reflectante, de modo que qualquer que sejam seus movimentos, apresentam sempre a mesma superfície reflectante em direção ao telêmetro.

O banco de dados, proporcionado pela Geodesia espacial e os resultados obtidos ao longo de sua breve existência, é de um volume considerável. No primeiro caso as precisões alcançadas são centimétricas, como mínimo, quando se estuda a posição relativa entre várias estações ou quando se observa sistematicamente uma mesma base com a ajuda da telemetria laser ou usando a radio-interferometria. No interior dos continentes, as precisões das redes geodésicas são melhores e se configuraram algumas outras, graças ao sistema TRANSIT, naquelas regiões que não as possuíam (África e América do Sul). O sistema TRANSIT, chamado também NAVSAT ("Navy Navigation Satellite System"), foi um sistema criado por "Johns

Hopkins University" para localizar submarinos com mísseis balísticos.



O satélite TRANSIT 1B, o primeiro da série; logo substituído pela constelação GPS.

Antes do ano de 1957, se supunha que o geóide coincidia sensivelmente com um elipsóide de revolução, o que equivalia, em termos dinâmicos, a supor que a gravidade real coincidia com a normal. A tal elipsóide se le atribuía um semi-eixo equatorial demasiado grande e um achatamento também errôneo. Pouco tempo depois do lançamento do Sputnik e do primeiro Vanguard americano, se estabeleceu um claro paralelismo entre as irregularidades das trajetórias dos satélites e as da gravidade, que indicavam certo aumento da rigidez terrestre com relação ao grau de plasticidade associado aos modelos elipsoidais previstos.



O satélite artificial VANGUARD I, a resposta americana ao Sputnik, foi lançado ao espaço no dia 17 de março de 1958.

Assim Ann E. Bailie e John O’Keele, astrônomo e geodesta da NASA, propuseram um modelo irregular para a Terra, chegando a calcular suas discrepâncias com o esferóide convencional. Ainda que este primeiro geóide, fruto da geodesia espacial, resultara demasiado simétrico e simplificado, é incontestável que serviu para comprovar que o raio médio, correspondente ao Pólo Sul, era uns 40 metros mais curto que o homólogo do hemisfério Norte, uma diferença que permitiu anunciar a forma piriforme da Terra, a qual seria plenamente confirmada pelos satélites posteriores.



John O'Keefe e o primeiro modelo piriforme calculado por ele e elaborado por Ann E. Bailie.

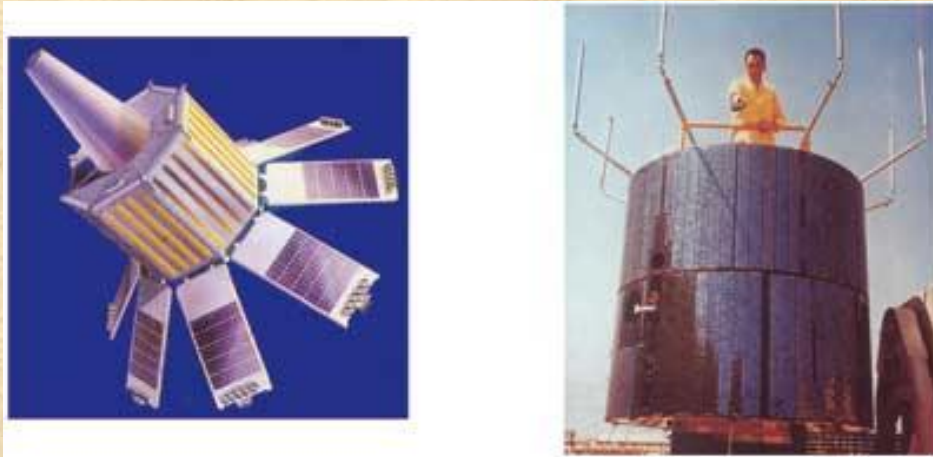
A determinação rigorosa do geóide não é um problema de fácil solução, tendo em conta os mais de 1.000 parâmetros necessários para descrevê-lo detalhadamente, ainda que em termos globais, sua ondulação máxima, com relação ao elipsóide, é de 100 metros, a nível local apresenta numerosas elevações e depressões em relação ao mesmo; qualquer dos modelos apresentados até aqui é suficientemente ilustrativo, ainda que o GRIM 5 e o EGM 96 sejam dois bons exemplos. A precisão alcançada para as alturas do geóide varia entre alguns decímetros nos oceanos e alguns metros sobre os continentes, por cima dos quais não existe uma técnica que permita achar a ondulação com grande precisão.

No primeiro modelo, publicado em 1962, se truncou a série de harmônicos esféricos no grau quatro, usando somente os dados proporcionados pelos satélites; apesar destes, aparecia um importante harmônico zonal P3, que elevava o geóide sobre o Pólo Norte de 15 metros em relação ao elipsóide de referência, baixando-lhe outro tanto no Pólo Sul. O harmônico setorial P22 provocava cristas do geóide nas longitudes 165° EG e 15° WG, e depressões em 75° EG e 105° WG. Os trabalhos posteriores foram melhorando esses resultados e os modelos geoidais conseqüentes ao calcular os harmônicos de grau superior (1970: grau 10, 1980: grau 20). No ano de 1990 a equipe de geodésia espacial da NASA, "Goddard Space Flight Center (Greenbelt, Maryland)" publicou outro modelo, o GEM-T2, no qual se deram os coeficientes de todos os harmônicos até o grau 36 e 616 para outros de grau superior, até $n=50$ e $p=43$, é dizer 1908 coeficientes. A denominação do centro espacial da NASA deve seu nome ao investigador Robert Hutchins Goddard (1882-1945), um pioneiro da carreira espacial norte-americana.



R. H. Goddard

Nesse modelo, se utilizaram 2.386.000 observações sobre 1.130 arcos orbitais de 31 satélites com inclinações compreendidas entre $i = 15^\circ$ (Ste. PEOLE) até $i=144,3$ (Ste. OVI 2), e particularmente os dois satélites estritamente polares ($i=90^\circ$) SBN 2 e NOVA 1, além do geostacionário ATS 1. Em 20 deles se incluíram observações ópticas, em 4 as observações Doppler e em 11 as de telemetria laser. Assim mesmo se empregaram, pela primeira vez, os resultados da telemetria laser entre satélites (ATS 1 e GEOS 3), com a vantagem de ter eliminado, desse modo, as correções por refração na ionosfera e na troposfera, nunca bem conhecidas. O erro médio quadrático desse geóide se estimou em 1,3 m.



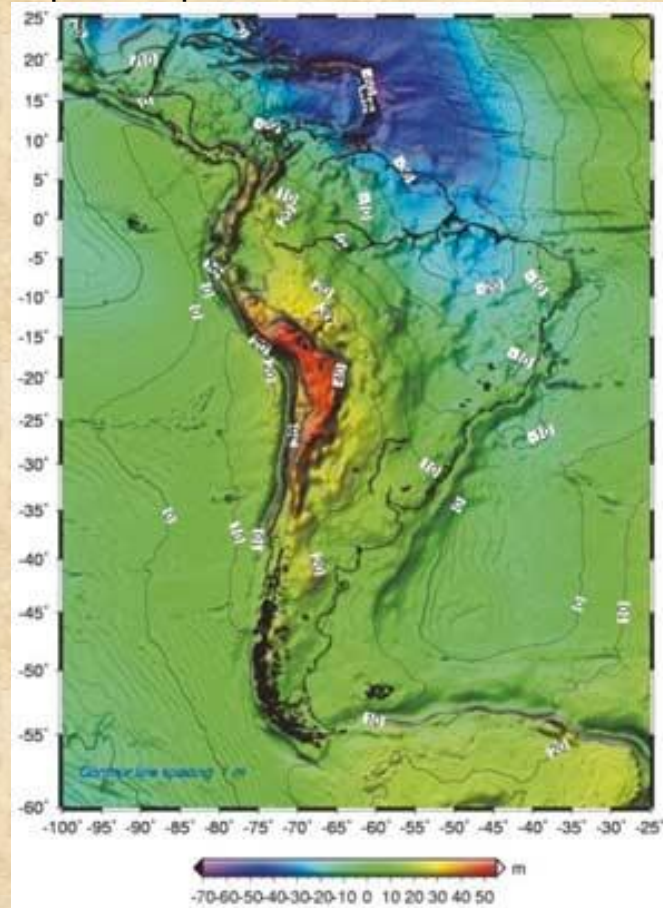
Os satélites PEOLE e ATS 1.

O grupo GRIM, por sua parte, continuou aperfeiçoando seus modelos do geóide, a última versão GRIM 5 se denominou assim para indicar que se havia chegado a ele através de um quinto reprocessamento de dados. Para sua formação se analisaram as perturbações orbitais de 21 satélites; representando-se, no correspondente desenvolvimento em série, os coeficientes dos harmônicos esféricos do neopotencial até o grau 99 e a ordem 95. Desenvolveram-se outros modelos que ademais das observações de satélites se tem baseado também nas observações gravimétricas terrestres, o GRIM 4 - C2 e o OSU 89 B ou o OSU 91 A, calculados por Richard H. Rapp e outros, na Universidade Estatal de Ohio (Columbia), podem servir de exemplo. No OSU 91 A, por exemplo, se teve em conta mais de 45 valores da anomalia da gravidade, irregularmente repartidos, e os resultantes de interpolar sobre 259.200 quadrados de $0^\circ30' \times 0^\circ30'$, sendo usado com freqüência o sistema de posicionamento GPS para calcular a altitude sobre o mesmo.



H. Rapp, professor emérito da Universidade Estatal de OHIO, entre duas imagens perspectivas do geóide.

Os procedimentos mais modernos, para calcular geóides detalhados, empregam técnicas baseadas nas transformações rápidas de Fourier (FFT), assim se tem construído no "National Geodetic Survey", os modelos GEOID 90, 93, 96, 99, 03 e os EGM 96 e 99, que incluem, cada um, mais de um milhão e meio de medidas gravimétricas (marítimas e terrestres), além das próprias da geodésia espacial. A diferença entre os geóides obtidos pelos diferentes métodos e equipes é da ordem de 0,5 m, estimando-se que sua precisão absoluta se encontre entre 1 e 2 m.



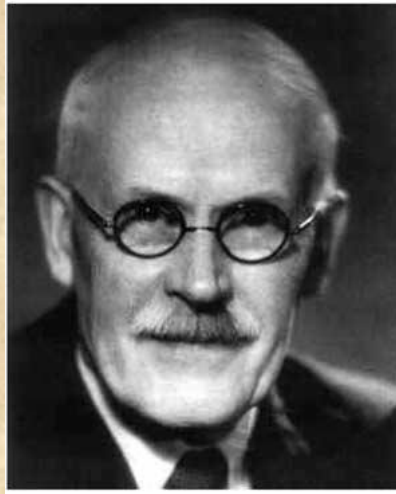
O geóide andino calculado pela Universidade livre de Berlim, através do EGM 96.

Outro dos resultados proporcionados pela Geodesia espacial foi a contínua elaboração de diversos sistemas geodésicos mundial de referência, os conhecidos WGS (World Geodetic System) e GRS (Geodetic Reference System). A definição de tais sistemas é uma questão muito complexa que necessita o processamento dos dados correspondentes a vários milhões de observações para poder calcular o valor de cerca de 1.500 parâmetros, dentro de tais observações se contemplam, além das de laser, as radioelétricas, altimétricas e interferométricas (VLBI), as clássicas terrestres e especialmente as gravimétricas substitutas das altimétricas, nas zonas continentais.

Recorde-se que antes da era espacial o sistema geodésico estava constituído pelo elipsóide de Hayford de 1909, internacional desde a assembléia realizada em Madri (1924), completado seis anos depois pela fórmula internacional da gravidade, cujos parâmetros principais foram seus valores, no equador e nos pólos, de:

$$\gamma_E = 9.780490 \text{ ms}^{-2} \text{ y } \gamma_P = 9.832213 \text{ ms}^{-2}$$

Ficava assim definido o sistema geodésico pelo conhecimento de quatro parâmetros: dois geométricos (a , f) e dois dinâmicos (os valores da gravidade do ano de 1930), os quais permitiam descrever o elipsóide de revolução equipotencial, junto ao campo da gravidade normal gerado por ele mesmo.



O astrônomo e geofísico inglês Sir Harold Jeffreys, o primeiro em defender a existência do núcleo líquido da Terra.

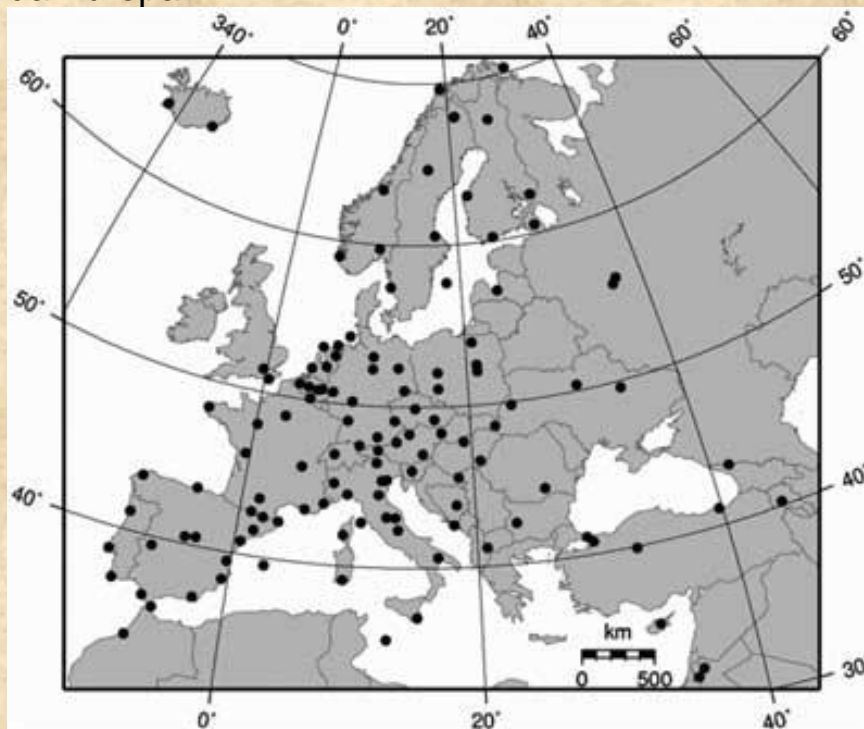
Ainda que os trabalhos de Harold Jeffreys (1891-1989), Krasovsky e A. A. Izótov mostraram que os parâmetros geométricos não eram os mais adequados, o sistema anterior foi considerado como a melhor aproximação da forma da Terra, durante muitos anos. Todavia, o sistema permaneceu vigente até que a metodologia da geodesia espacial, combinada com as novas medidas terrestres de grandes arcos (muito mais exatas que as primitivas), e com outras determinações gravimétricas, permitiu superar-lo ao estabelecer sucessivos modelos, sempre auspiciados pela UGGI ou pela União Astronômica Internacional (IAU). Todos os sistemas estão caracterizados pelas quatro constantes fundamentais e por outras denominadas derivadas. As constantes fundamentais são: o semi-eixo maior do elipsóide de revolução (a), a constante geocêntrica da gravidade (GM), o fator de elipticidade geopotencial (J_2) e a velocidade angular da rotação terrestre (ω).

Entre as derivadas geométricas figuram: a excentricidade, o achatamento, o semi-eixo menor e o comprimento do quarto de meridiano; e entre as dinâmicas: o potencial, a gravidade equatorial e a polar; geralmente se supõe condensada a atmosfera sobre a superfície do elipsóide. Dentre todos os sistemas geodésicos possíveis foram eleitos, como mais significativos, o WGS 84, o ITRS e o ETRS 89. No WGS 84, ao que se referem as observações GPS, se contempla um sistema de coordenadas trirretangular com origem no centro de massa da Terra (geocentro), seu eixo dos "z" é paralelo a direção do polo médio internacional (1903), definido pelo BIH, o eixo das abscissa é a intersecção do equador médio com o meridiano origem de Greenwich e o das ordenadas é também equatorial, formando com os anteriores o clássico triedro trirretangular "dextrorsum". O elipsóide escolhido, em tal sistema, foi o denominado GRS 80, segundo a decisão tomada em Camberra (1979), na ocasião da reunião celebrada pela União Internacional de Geodésia e Geofísica. Os dois semi-eixos desse elipsóide são os seguintes: $a = 6.378.137 \text{ m} \pm 2\text{m}$ e $b = 6.356.752,3 \text{ m} \pm 2\text{m}$, o que equivale a dizer que seu achatamento vale



Logotipo do WGS 84

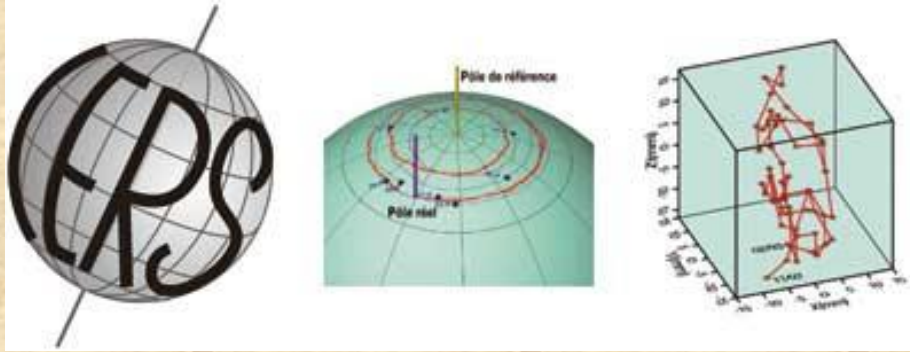
A dissolução de RETRIG coincidiu com a constituição de EUREF, cujo objetivo básico foi incorporar à rede europeia, os dados procedentes de observações VLBI (Very Long Base Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), LLR (Lunar Laser Ranging) e GPS. No ano de 1987, EUREF e CERCO (Comité Europeu dos Responsaveis da Cartografia Oficial), decidiram criar um sistema de referência geodésico, baseado em técnicas espaciais, que se apoiaria, ao mesmo tempo, no ITRS ("Internacional Terrestrial Reference System"). A rede EUREF, iniciada formalmente no ano de 1989, graças a uma campanha internacional de observações GPS, tem melhorado substancialmente sua configuração ao ser estendida até os países do Leste da Europa.



A Rede GPS de estações, os chamados pontos EUREF

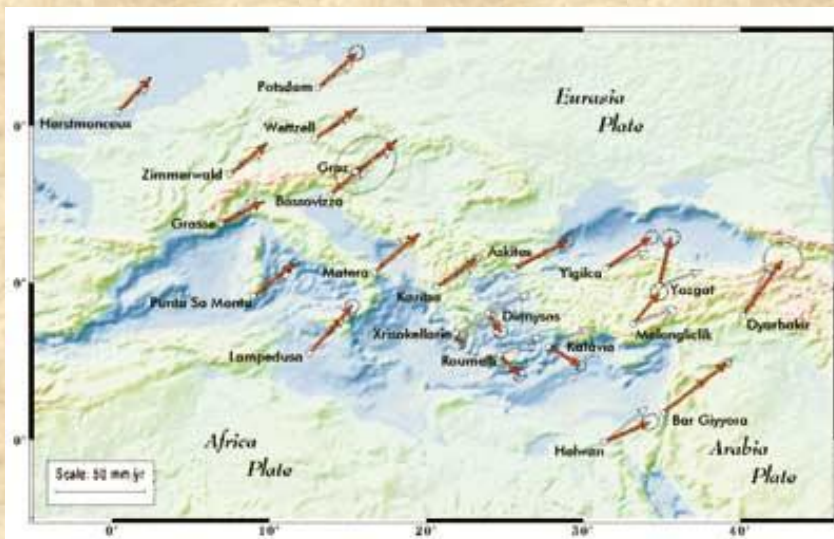
O ITRS é gerenciado pelo IERS ("Internacional Earth Rotation Service") e consta de quase 300 pontos, cujas coordenadas têm sido determinadas mediante VLBI, LLR, SLR, GPS e DORIS ("Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated

by Satellite"). Este último sistema geodésico é inquestionavelmente o mais exato a que se pode recorrer, até o ponto de que as coordenadas que proporciona é função do tempo. Desde sua criação, o IERS vem proporcionando a cada ano, um marco de referência, combinando os dados enviados pelos diversos centros que colaboram neste projeto, identificado pelo acrônimo ITRF seguido das duas últimas cifras do ano em questão. O elipsóide associado ao sistema é o mesmo do WGS 84. A velocidade de rotação da Terra em torno de seu eixo, se estimou em $7.292.115 \times 10^{-11}$ rad.s⁻¹.



Logotipo do sistema geodésico ITRS e dois dos resultados proporcionados pelo sistema Doris: uma representação da polodia e a variação do centro de gravidade da Terra (o lado do quadrado é de 1cm)

O sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), se define a partir do anterior, ainda que este último esteja ligado a parte estável da placa euroasiática, de maneira que, para uma época dada, teria que aplicar sua velocidade global as coordenadas que localizem um ponto genérico da superfície terrestre. Este novo sistema europeu foi estabelecido pela Subcomissão X (EUREF) ao amparo da reunião celebrada em Ankara (1996), pela Associação Geodésica Internacional.



Movimentos tectônicos da Placa Euro-asiática, segundo o "Goddard Space Flight Center" da NASA.

O conjunto de possíveis aplicações da Geodesia espacial é praticamente ilimitado, centrado a atenção no estudo da Terra, é evidente que com as precisões alcançadas hoje em dia, são possíveis aplicações: guiar um míssil ou lançar um satélite, projetar oleodutos de várias centenas de quilômetros, obter a imagem cartográfica de territórios inexplorados, ou bem ministrar valiosa informação ao

coletivo geofísico sobre movimentos tão lentos e de tão pouca amplitude como os geodinâmicos.

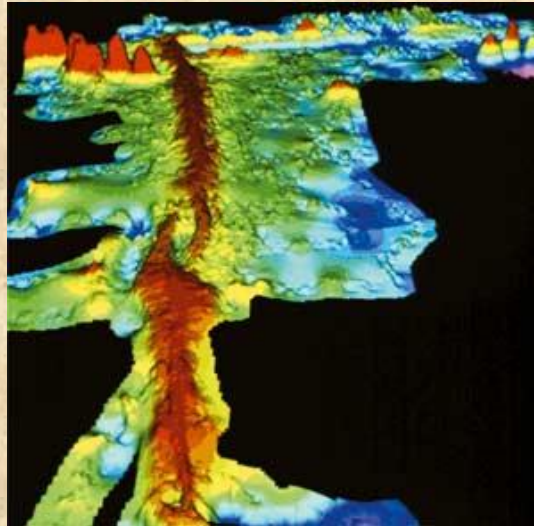


Imagem tridimensional de uma das dorsais existentes no Oceano Pacífico. As zonas representadas mediante cores quentes (do vermelho ao amarelo) estão por cima do solo oceânico, em troca estão por baixo dele as das cores mais frias (do verde ao azul).

O certo é que com as atuais técnicas da geodésia espacial possa-se quantificar deslocamentos centimétricos por ano, como os que experimentam as placas tectônicas ou as falhas a elas associadas. Tais técnicas se complementam com as clássicas auscultações terrestres (triangulações, trilaterações e nivelamentos), para medir a amplitude do movimento através do deslocamento dos sinais fixos, colocados em um e outro lado da falha supostamente ativa. Os resultados obtidos, em relação com a evolução das placas tectônicas, são na maioria dos casos coerente com os estudos geodésicos e paleomagnéticos.

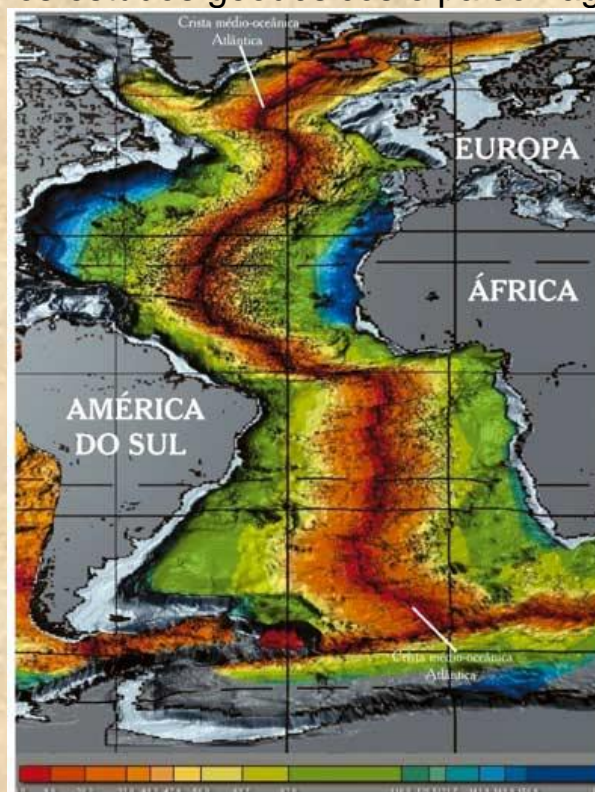
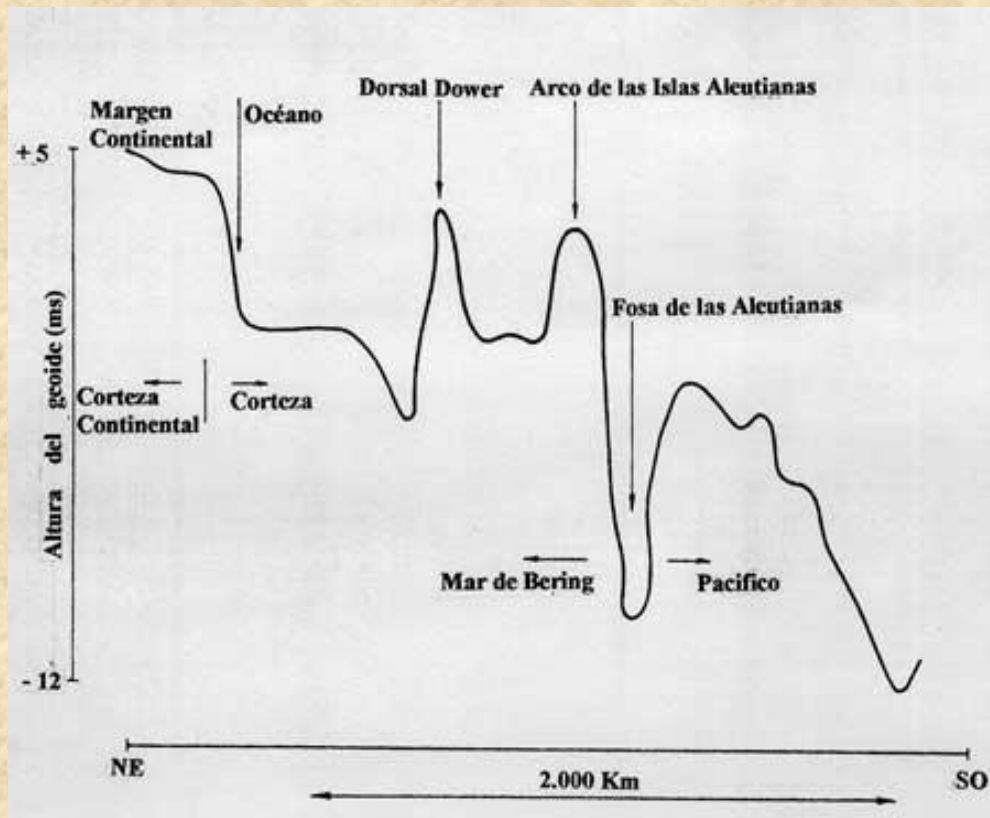


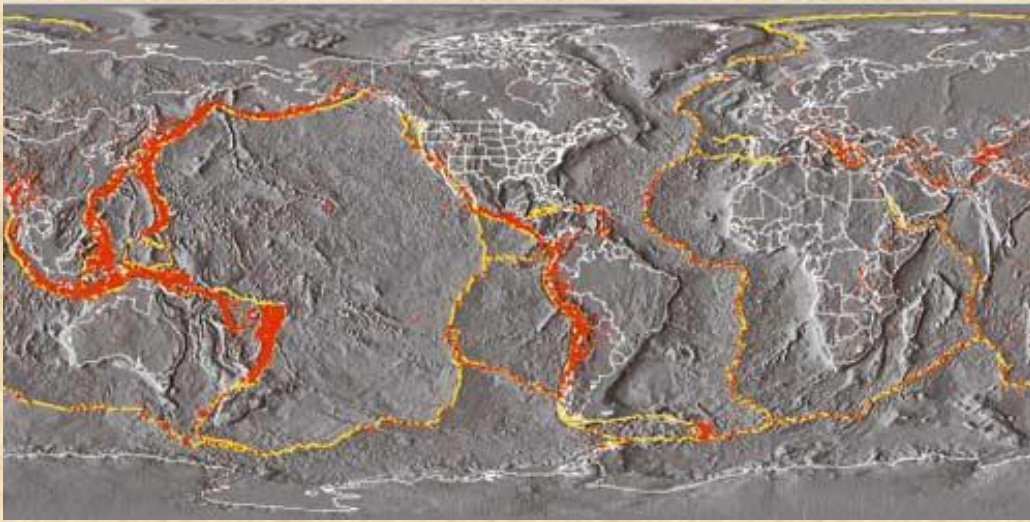
Imagem cartográfica da dorsal Atlântica. As cores simbolizam a antiguidade da crosta oceânica formada a partir da mesma. A zona vermelha é a crosta mais recente, enquanto a azul se formou há uns 180 milhões de anos.

Deve citar-se, como aporte recente, as deformações globais da Terra postas em evidência ao comparar-se as diversas determinações de seu campo gravitacional, tudo indica que o achatamento vá diminuindo com a lentitude. O fenômeno parece ligado a elevação paulatina dos blocos escandinavo e canadense, uma conseqüência isostática do desaparecimento das grandes calotas glaciais. Outra aplicação da geodésia espacial é o estudo da variação do nível do mar, ainda que também se ocupe de outros movimentos muito mais rápidos, as já referidas marés terrestres. O conhecimento, cada vez mais preciso e detalhado do campo gravitacional, tem numerosas aplicações no estudo da Terra, assim nas representações globais do geóide se comprova que seu relevo, com relação ao elipsóide, não corresponde com seu homólogo terrestre, porém sim com o submarino.



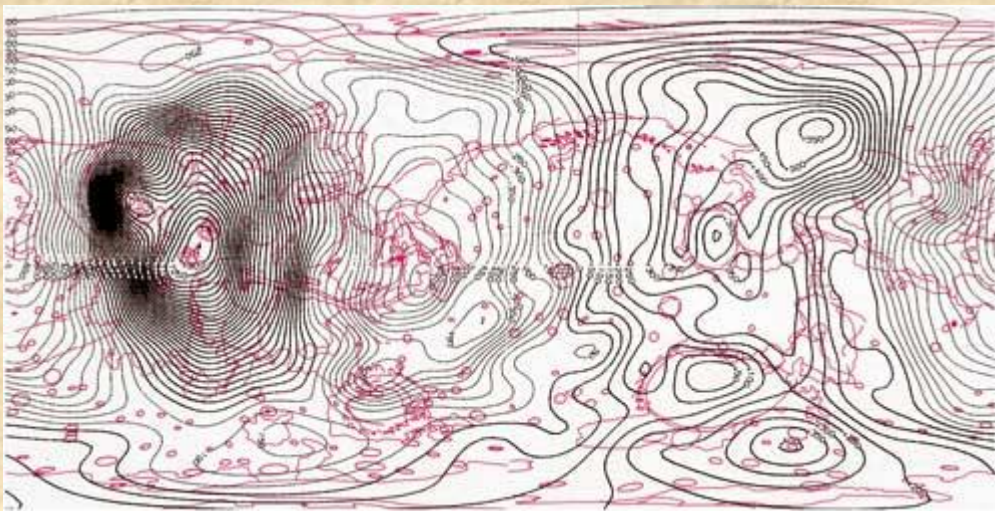
Perfil do geóide na região das Aleutas, ao Norte do Oceano Pacífico (Altimetria do satélite Seasat).

Efetivamente, nas zonas de subducção, coincidentes com a existência de grandes fossas oceânicas, o geóide apresenta geralmente uma depressão de 15 a 20 m de profundidade sobre uma extensão em torno de 200 km. Pelo contrário, as dorsais oceânicas dão lugar a uma anomalia positiva de alguns metros de amplitude, sobre uma extensão próxima aos 100 km, por cima das zonas de fratura (falhas transformantes perpendiculares a dorsal). Nas proximidades das margens continentais (transição entre a crosta continental e oceânica), existe um degrau abrupto de uns 5 m, estendido por uns 100 a 200 km. A correspondência entre os vulcões submarinos e as ondulações do geóide, é outro exemplo: na projeção superficial da maioria dos vulcões ou cadeias vulcânicas submarinas aparece uma anomalia ou ondulação positiva de 5 a 10 m de amplitude, com uma extensão superficial compreendida entre 100 e 500 km.



A sismicidade global e as placas tectônicas representadas sobre um Modelo Digital da Terra. Na cor vermelha figuram os epicentros dos terremotos ocorridos entre 1880 e 1990, com uma magnitude maior que cinco. As bordas das placas aparecem de cor amarela. Finalmente, as linhas de costa e as fronteiras administrativas aparecem em branco.

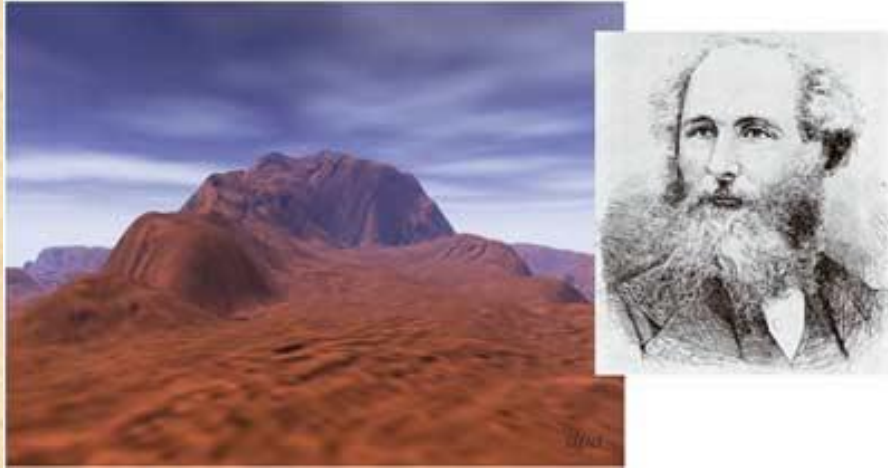
Essa correlação é a mais clara evidência do fenômeno isostático, de modo que do estudo do geóide se pode deduzir o estado de compensação isostática do manto superior da Terra e compreender, eventualmente, o mecanismo de compensação, assim como os modelos reológicos da litosfera e a geografia sísmica. O objeto desse tipo de aplicação é tratar de compreender o porquê de tais acidentes, as razões temos que buscá-las, como já apontava D'Alembert, no interior da Terra: subducção de placas tectônicas, células de convecção no manto, a nível global, ou existência de uma elevação isolada sobre um mar profundo, em termos mais locais. Ao identificar, em primeira aproximação, a superfície do geóide com a média oceânica (a diferença é da ordem decimétrica), se compreende que com os métodos da Geodésia espacial, e em particular com seus satélites altimétricos, pode-se analisar também fenômenos superficiais relacionados com as correntes, ventos, temperatura ou salinidade, proporcionando aos oceanógrafos uma série de dados fundamentais para seus estudos.



Geóide marciano calculado a partir das perturbações orbitais do Mariner 9 e dos Viking (I y II). Elipsoide ($a = 3.394$ km, $f = 1/191,1$), equidistancia entre curvas 50 metros. A grande anomalia positiva está marcadamente correlacionada com a região dos grandes vulcões.

Menção a parte, merece os aportes da Geodesia ao estudo do sistema solar,

incluindo a análise das superfícies equipotenciais dos campos de gravidade, criados por satélites e planetas do mesmo, até o ponto de poder falar com propriedade de geodesia planetária. Entre os possíveis exemplos, cabe citar: as definições de latitude planetocêntrica e planetográfica, como generalização da latitude geocêntrica e geodésica, a determinação do solenóide, como superfície equipotencial, origem da Lua ou a representação do geóide de Marte, sobre certo elipsóide de referência.



As montanhas de Maxwell, no planeta Venus, representadas graças ao sistema radar instalado na sonda Magalhães. O topônimo é em homenagem ao grande físico inglês James Clerk Maxwell (1831-1879).

Em resumo podemos dizer que o problema de calcular as altitudes de algumas superfícies físicas planetárias ou de satélites (dos planetas menores ou maiores), se tem resolvido, em certas ocasiões, empregando-se o radar, ao igual que no geóide marinho da Terra; esse foi o caso das montanhas de Maxwell em Vênus, com uma altitude maior que 12 km.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGROW, L. 1985. History of Cartography. Precedent Publishing, Chicago.
- BESSERO, G. 1985. Cours de Géodésie (2 vol.). Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine, Brest.
- BOCHNER, S. 1991. El papel de la matemática en el desarrollo de la ciencia. Alianza Universidad, Madrid.
- BOLSHAVOV, V. & GAIDATEV P. 1989. Teoría de la elaboración matemática de las mediciones geodésicas. Editorial Mir, Moscú.
- BROWN, L.A. 1979. The story of Maps. Dover Publications, New York.
- CLARKE, A.R. 1910. Tratado de Geodesia. Casa Editorial Baillo-Bailliere, Madrid.
- DELAMBRE, J.B. 1912. Grandeur et Figure de la Terre. Gauthier-Villars, París.
- DRAGONI, G. 1979. Eratostene e l'apogeo delle scienza greca. Bologna.
- DUPUY, M. & DUFOUR, H.M. 1969. La géodésie. PUF, París.
- FRANCOUER, L.B. 1985. Géodésie ou traité de la figure de la Terre et de ses parties. Gauthier-Villars, Paris.
- GARLAND, G.D. 1965. The Earth's Shape and Gravity. Pergamon, London.
- KLEIN, H. A. 1988. The Science of Measurement. A Historical Survey. Dover Public., New York.
- KRETSCHMER, K. 1942. Historia de la Geografía. Editorial Labor, Barcelona.

- LACOMBE, H. & COSTABEL, P. 1988. La figure de la Terre du XVIII siècle à l'ère spatiale. Gauthier-Villars, París.
- LASALLE, T. 1990. Cartographie, 4000 ans d'aventures et de passion.IGN-Nathan, París.
- LAUSSE DAT, A. 1898. Recherches sur les instruments, les méthodes et le dessin topographiques Gauthier- Villars, París.
- LEVALLOIS, J.J. 1969-1974. Géodésie Général (4 vol., el cuarto en colaboración con J. Kovaleski). Enrollees Editeur, París.
- LOWENTHAL, M.A. 1995. Who's who in the History of Cartography. Map Collector Publ. Ltd.
- MARTIN LOPEZ, J. 2002.: Historia de la Cartografía y de la Topografía. CNIG, Madrid.
- MIFSUT MACON, A. 1905. Geodesia y Cartografía. Talleres del depósito de la Guerra, Madrid.
- NEUGEBAUER, O. 1957. The Exact Sciences in Antiquity. Brown University Press, 2ª ed.
- PERRIER, G. 1939. Petite Histoire de la Géodésie, comment l'homme a mesuré et pesé la Terre. Presses Universitaires de France, París.
- RADIX, J.C. 1991. Repertoire géodésique, en vue de la navigation. E. cepadues, Toulouse.
- RHIND, D.N. & TAYLOR, D.R.F. 1989. cartography, past, present and future. International Cartographic Association.
- RUIZ MORALES, M. 2003. Nociones de Topografía y Fotogrametría Aérea. Universidad de Granada.
- Los Ingenieros Geógrafos. 2003. CNIG, Madrid.
 - Complementos Geodésicos y Cartográficos. 2005. Universidad de Granada.
- RUIZ MORALES M. & RUIZ BUSTOS, M. 2000. Forma y Dimensiones de la Tierra, síntesis y evolución histórica. Ediciones del Serbal, Barcelona.
- RUIZ MORALES M, IBARGÜEN SOLER J, & RUIZ BUSTOS, M. 2002. Investigaciones sobre Temas de Geodesia Superior y Método de los Mínimos Cuadrados. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- SEEBERG, G. 1993. Satélite Geodesy, fundations, methodes and applications. Walter de Gruyter, Berlin.
- SMITH, J.R. 1997. Introduction to Geodesy, The History and Concepts of Modern Geodesy. John Wiley & Sons Inc., New York.
- TORGE, W. 1980. Geodesy.Walter de Gruyter. Edición por español por Ed. Diana, México.
- VANICEK, P. & KRAKIWSKY, E.J. 1986. Geodesy, the concepts. Elsevier Science Public. , Amsterdam.
- WILFORD, J.N. 1982. The Map maker. Random House, New York.