OTÁVIO YASSUO ITAME

CONTROLE DE QUALIDADE APLICADO NA MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas para a Obtenção do Título de Mestre em Ciências pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa

Presidente Prudente

2001

Itame, Otávio Yassuo.
I85c Controle de qualidade aplicado na modelagem digital de terreno / Otávio Yassuo Itame. - Presidente Prudente: [s.n], 2001.
106 p. : il. ; 29 cm.

Dissertação (mestrado). - UNESP, Faculdade de Ciências Tecnologia, Presidente Prudente, 2001.
Orientador : Prof.: Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa.

1. Topografia 2. Modelagem digital de terreno (MDT)
3. Controle de qualidade.
I.Título.

CDD (18ª ed.) 623.71

COMISSÃO EXAMINADORA

DADOS CURRICULARES

OTÁVIO YASSUO ITAME

NASCIMENTO	16.08.1956 – PRESIDENTE PRUDENTE/SP
FILIAÇÃO	Minoru Itame Chieco K. Itame
1978/1992	Curso de Graduação : Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia
1983/2001	Auxiliar de Ensino do Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia
1999/2001	Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, nível de Mestrado, na Faculdade de Ciências e Tecnologia – Unesp

À minha esposa Ana Maria e meus filhos Gabriel, Jacqueline e Daniel, pelo amor, compreensão e constante incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa, pela orientação, sugestões e paciência.

Ao Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela amizade, ensinamentos úteis e espírito de solidariedade.

Ao Prof. Dr. Nilton Nobuhiro Imai, pela ajuda e apoio nas dificuldades.

À Profª. Dra. Arlete Aparecida Correia Meneguette, pelo apoio e solidariedade.

Ao Elivagner Barros de Oliveira, que tem contribuído na coleta e processamento dos dados.

E por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esta tarefa fosse concluída.

SUMÁRIO

RESUMO..... ix
ABSTRACT..... x

1 INTRODUÇÃO..... 1

1.1 Objetivo..... 3

1.2 Descrição do trabalho..... 3

2 MODELOS DIGITAIS DO TERRENO..... 5

2.1 Aplicações dos modelos digitais de terreno.... 8

2.2 Dados da superfície real..... 9

2.3 Funções de interpolação..... 12

2.3.1 Funções que interpolam a partir de Superfícies..... 13

2.3.2 Funções que interpolam a partir de pontos discretos..... 16

2.3.2.1 Ponderadores determinísticos..... 17

2.3.2.2 Ponderadores estocásticos..... 20

3 CONTROLE DE QUALIDADE..... 22

3.1 Análise da exatidão e precisão..... 25

3.2 Análise de tendências e precisão..... 28

3.3 Tamanho da amostra..... 31

4 MÉTODOS DE LEVANTAMENTO..... 35

4.1 Sistema de coordenadas..... 35

4.1.1 Sistema de coordenadas cartesianas..... 35

4.1.2 Coordenadas Geodésicas..... 36

4.1.3 Sistema de Referência WGS-84..... 38

4.1.4 Sistema Geodésico Brasileiro..... 41

4.2 Levantamento com GPS..... 42

4.3 Métodos topográficos..... 48

5 DESENVOLVIMENTO..... 55

5.1 Área de estudo..... 56

5.2 Equipamentos utilizados..... 58

5.3 Programa topoGRAPH..... 59

5.4 Coleta de dados..... 60

5.5 Processamento dos dados..... 64

6 RESULTADOS OBTIDOS..... 75

7 CONCLUSÃO..... 83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 86

ANEXOS..... 91

RESUMO

Nesta Dissertação uma série de levantamentos topográficos foi realizada utilizando-se estações totais para a aquisição de pontos amostrais aleatoriamente espaçados.

Modelos digitais do terreno foram gerados utilizando-se os pontos amostrais e adotando-se o programa topoGRAPH, empregando-se a triangulação de Delaunay e interpolação por B-spline, com a finalidade de analisar a densidade mínima necessária para a produção de documentos cartográficos.

Tais modelos digitais do terreno foram analisados empregando 20 pontos de verificação bem distribuídos na área de estudo com 7,5 hectares, localizada no campus universitário da Unesp de Presidente Prudente.

Foi realizada análise de exatidão e precisão dos modelos digitais, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

No presente trabalho foi adotada a eqüidistância de 1 metro entre as curvas de nível e geradas plantas na escala de 1:3.000.

Resultados obtidos indicaram que a densidade mínima de pontos depende da declividade do terreno.

ABSTRACT

In this Dissertation a series of topographical surveys was carried out by employing total stations for the acquisition of sampling points randomly distributed.

Digital terrain models were generated using the sampling points and adopting the topoGRAPH software, choosing Delaunay triangulation and B-spline interpolation, aiming at the analysis of a minimum density which is necessary for the production of cartographic documents.

Such digital terrain models were analysed using 20 checking points well distributed in the study area which has 7.5 hec and is located at Unesp campus in Presidente Prudente.

Accuracy and precision analysis was carried out by adopting the standards suggested by the Brazilian Cartography Technical Rules.

In this work it was chosen an vertical interval of 1 meter between the contour lines and plotting scale of 1:3.000.

Results obtained in this research show that the minimum density of points depends on the terrain slope.

1. INTRODUÇÃO

Para o planejamento de diversos trabalhos em engenharia, é necessário que se tenha um mapa ou planta topográfica, que represente a área de interesse ao projeto, com informações adequadas e atualizadas.

A representação da superfície topográfica de forma adequada permite a obtenção de diversas informações, tais como: a distância vertical entre pontos, a inclinação de talude, a construção de perfis, intervisibilidade entre pontos, elementos para o cálculo de áreas e volumes, entre outras.

Embora a superfície topográfica seja geralmente considerada como uma superfície matematicamente contínua, difere de muitas outras superfícies contínuas.

Para produzir mapas ou plantas topográficas, são selecionados pontos amostrais de uma superfície de forma a representar o seu contorno adequadamente.

A manipulação dessas informações (pontos selecionados), por processos manuais, é extremamente

difícil devido ao grande volume de dados, tornando-os onerosos e de qualidade às vezes discutível.

Com a criação das técnicas de modelagem digital do terreno, tornou-se possível solucionar diretamente todos esses problemas, através de um modelo numérico representativo do terreno que pode ser trabalhado para se obter as informações desejadas.

A elaboração e criação de um modelo digital do terreno é fundamental para a representação de uma superfície topográfica. Esse modelo pode ser apresentado através de equações matemáticas (polinômios, séries de Fourier, splines), definindo uma superfície contínua para representar o terreno.

As equações matemáticas podem ser globais, aplicáveis à toda a área a ser mapeada, ou locais, quando se subdivide o terreno em várias parcelas.

O modelo digital pode ser apresentado também através de uma rede de pontos (malha quadrada, retangular, triangular) que podem estar distribuídos de forma ordenada ou de forma aleatória.

Diante da diversidade de processos para a obtenção de M.D.Ts., torna-se necessário o estudo para avaliar a aplicabilidade dos métodos às diversas

finalidades, uma vez que não existe um método universal que atenda de forma adequada a todas as formas de dados e funções utilizadas no modelamento.

Os pontos, formando uma malha com grande densidade, foram coletados com distribuição irregular, seguindo as características do terreno.

1.1 Objetivo

O presente trabalho objetiva a avaliação, por métodos estatísticos, do modelo digital do terreno através de pontos coletados da área de estudo por procedimentos topográficos usando de estações totais, fazendo-se a análise da precisão e exatidão.

1.2 Descrição do trabalho

Buscando sistematizar a exposição, o trabalho foi dividido em 6 capítulos. O capítulo 2, a seguir, resume a pesquisa bibliográfica desenvolvida com vistas à construção de modelos digitais do terreno, sugerindo algumas classificações e divisões didáticas para os métodos de interpolação pesquisados.

No capítulo 3, encontram-se os modelos estudados e adotados para a realização do controle de qualidade dos modelos digitais gerados, com base na normas estabelecidas no padrão de exatidão cartográfica.

No capítulo 4, são descritos os métodos de levantamentos com o uso do GPS, e também através dos métodos convencionais.

No capítulo 5 apresenta-se todo o desenvolvimento do trabalho, fazendo-se testes com diversas densidades de pontos amostrais para a geração dos modelos.

Os resultados obtidos a partir modelos gerados e o controle de qualidade do documento cartográfico são apresentados no capítulo 6.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas a conclusões de toda a dissertação.

2. MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Para Alberti et al. (1995) representação do relevo é uma componente fundamental do processo cartográfico, e muitas têm sido as técnicas desenvolvidas para representar uma superfície tridimensional num espaço bidimensional.

Dentre as mais conhecidas, pode-se apontar a que representa a superfície por linhas contínuas, as quais unem pontos de igual valor de altitude, ou seja, as curvas de nível. Tal técnica é muito utilizada nas diversas áreas da engenharia.

Como o processo era executado de forma manual, utilizava-se para a construção dos mapas com curvas de nível, técnicas mais simples, devido ao volume de cálculos envolvidos. Contudo, com o advento do computador e da plotagem automática, tais técnicas foram sendo automatizadas, proporcionando maior rapidez e sofisticação ao processo, desde a fase de coleta de dados até a sua conclusão.

Segundo Carter (1988), com a automatização de mapeamentos, muitos novos processos e procedimentos têm sido desenvolvidos. Cada aproximação é apropriada para um determinado tipo de mapa, não tendo, portanto,

um procedimento universal que sirva igualmente bem para todas as formas de dados, armazenamento, transformação e apresentação.

Diante da automação, muitos tipos de mapas são construídos usando um grande leque de procedimentos e técnicas com várias combinações de levantamentos de campo, estereocompilação, foto-interpretação, análise estatística e compilação temática em escalas pequenas.

Para qualquer tipo de dados, há certa expectativa quanto aos procedimentos e práticas que poderão ser adotados na construção do mapa.

Segundo OSTMAN apud Mitishita (1997) *Modelo Digital de Terreno ou D.T.M.(Digital Terrain Model) é o termo genérico empregado para referir-se ao modelamento matemático de superfícies. Pode-se definir modelo digital de terreno como sendo um conjunto de pontos amostrados da superfície real, com coordenadas espaciais (x, y, z) determinadas num dado referencial e um algoritmo que possibilite construir um modelo matemático que reproduza da melhor maneira possível o comportamento altimétrico da superfície real.*

A utilização prática de um M.D.T., até bem pouco tempo atrás, limitava-se a poucas aplicações na

área de cartografia com o traçado de curvas de isovalores ou a geração de perfis altimétricos. Contudo, com o desenvolvimento de computadores com maior velocidade de processamento e maior capacidade de armazenamento das informações, tem-se utilizado o M.D.T. para a resolução de diversos problemas de engenharia que necessitam de informações do comportamento altimétrico de uma dada superfície.

Jancaintis e Junkins (1973) em seu trabalho sobre modelamento de superfícies irregulares e, citando os autores Light, Beggin e Jhonson et alli, descrevem que a cartografia automatizada requer o modelamento de superfícies mediante a criação de grades regulares muito finas e igualmente espaçadas para estimar pontos altimétricos a partir de pontos de controle ou observados.

Segundo Miller (1958), o Modelo Digital de Terreno (M.D.T.) é simplesmente uma representação estatística das superfícies contínuas do solo por um grande número de pontos selecionados com coordenadas x, y, z conhecidas num sistema de coordenadas arbitrário.

Para Miller e Laflamme apud Carter (1988), historicamente, o termo Modelo Digital do Terreno

(M.D.T.) tem sido o termo genérico usado para referir-se a qualquer representação digital de uma superfície topográfica. Burrough (1986) apud Carter (1988), estabelece que o termo Modelo Digital de Elevação (M.D.E.) é preferível, para modelos contendo somente dados de elevação porque “terreno” implica em atributos de formas do solo, muitas vezes a altitude da superfície da terra; e Evans (1980) usou o termo Modelo Digital do Terreno (D.M.G.) para qualquer conjunto de dados.

Neste trabalho adota-se a definição de MDT apresentado por Miller e Laflamme (1988).

2.1 Aplicações dos Modelos Digitais de Terreno

Os modelos digitais do terreno podem ser aplicados para inúmeras finalidades, dentre as quais podem ser destacadas:

a) Traçado automático de curvas de nível

Uma curva de nível representa o contorno de uma seção gerada pela intersecção do plano horizontal de cota pré-determinada com a superfície do terreno.

b) Geração de perfís

De modo análogo ao caso do traçado automático de curvas de nível, os perfís representam a intersecção de planos verticais, com a superfície do terreno.

c) Determinação de intervisibilidade de pontos

Este procedimento é utilizado na colocação de torres de microondas e em diversas aplicações militares.

2.2 Dados da superfície real

Segundo Mitishita (1997), a obtenção das informações da superfície real para fins de modelamento matemático de superfícies, consiste em levantar por uma técnica de amostragem um certo número de pontos com coordenadas (x, y, z). O processo de amostragem não pode ser conduzido de forma casual. A escolha de pontos deve ser realizada de maneira que o conteúdo dos mesmos represente o comportamento estrutural da superfície real. A correta definição dos pontos amostrados constitui a base de funcionamento dos algoritmos matemáticos utilizados na interpolação matemática de alturas.

Os pontos com suas coordenadas espaciais podem ser obtidos com base nas seguintes técnicas:

a) Levantamentos topográficos e geodésicos;

b) Aerofotogrametria;

c) Digitalização de mapeamentos analógicos;

d) Transformação de curvas de nível digitais em formato vetorial, para pontos com coordenadas espaciais;

e) Sistema de Perfilamento a Laser (ALS-Airborne LASER Sanning) ou Sistema de Mapeamento do Terreno por LASER Aerotransportado (ALTM-Ariborne LASER Terrain Mapper).

Cada uma dessas técnicas possuem vantagens e desvantagens quando comparadas com as precisões obtidas nas coordenadas, facilidades e tempo de execução dos trabalhos.

Para a escolha de uma das técnicas deve ser levado em conta, basicamente, o tipo de aplicação a que se destina o M.D.T..

A distribuição dos pontos formando uma amostra significativa do terreno pode ser regular (malhas retangulares ou quadradas) ou triangulares (aleatória, uniformemente distribuída, ou ainda concentrada por regiões).

Na distribuição regular, assume-se que os pontos são coletados em forma de uma matriz, onde os espaçamentos entre linhas e colunas são previamente determinados. Na prática, esta forma de amostragem de dados é quase sempre realizada em restituidores fotogramétricos que possibilitam de forma automatizada, a captura de pontos em intervalos de distâncias pré-determinados, formando assim, uma malha regular.

A distribuição segundo uma grade regular apresenta em relação às outras formas, a vantagem de permitir uma armazenamento mais econômico do ponto de vista computacional. Contudo, sua utilização indiscriminada, deve ser evitada, uma vez que a regularidade no espaçamento planimétrico acarretará, na maioria das vezes, a perda de detalhes importantes na caracterização do terreno.

A distribuição irregular é a forma mais genérica de amostragem de dados, tanto por

Fotogrametria como por Topografia. Nesta forma de apresentação dos dados, não se leva em conta o exato espaçamento dos pontos na malha, sendo os intervalos aproximados e definidos em função do tipo de relevo existente na região.

Neste caso, o maior interesse do método pela determinação da posição espacial dos pontos, é registrar as significativas mudanças de direção vertical do terreno, onde a preocupação não é de como os pontos se distribuem, mas sim, de como a amostra coletada poderá melhor traduzir a superfície a ser representada.

2.3 Funções de Interpolação

Uma função de interpolação, destinada a ser utilizada na modelagem da superfície física, estará sempre sujeita a diversas variáveis, tais como: a distribuição e densidade dos pontos adquiridos, a precisão obtida na determinação dos dados, o tipo de terreno a ser modelado e outras.

Desta forma, não é possível eleger uma função que atenda convenientemente a todas as injunções

existentes e, por esta razão diversos métodos são encontrados em uso.

Dentre as funções interpolantes mais adequadas à obtenção da feição altimétrica do terreno, é possível estabelecer-se a seguinte divisão:

a) funções que interpolam a partir de superfícies; e

b) funções que interpolam a partir de pontos discretos.

2.3.1 Funções que interpolam a partir de superfícies

Essas funções determinam as coordenadas altimétricas a partir da hipótese de que o ponto a ser interpolado pertence a uma superfície vinculada a um determinado conjunto de dados, relacionados espacialmente com a incógnita.

As funções que interpolam a partir de superfícies matemáticas, usualmente, empregam polinômios bivariados, onde a altura é dada em função das coordenadas planimétricas do ponto a interpolar.

Assim, o número de coeficientes do polinômio é dado pela expressão:

$$N = (n+1)(n+2)/2 \qquad (1)$$

Onde:

N = número de coeficientes

n = grau do polinômio

É possivel calcular os coeficientes, se forem conhecidas N equações, do tipo:

$$Z(x,y) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n-1} a_{ij} x^i y^j \qquad (2)$$

onde:

Z = coordenada altimétrica;

n = grau do polinômio;

a_{ij} = parâmetros do polinômio;

x,y= coordenadas planimétricas.

Dentre as funções que interpolam a partir de superfícies matemáticas, têm-se as funções spline, com muitas aplicações, como: aproximação de funções, interpolação numérica, ajustamento de curvas e superfícies, entre outras.

O termo spline refere-se à longa e flexível barra de metal utilizada pelos desenhistas para delinear as superfícies, evitando linhas com angulosidades entre pontos especificados.

Uma função spline de grau k, adaptada a n pontos, é constituída em cada intervalo entre dois pontos por arcos polinomiais de grau menor ou igual a k, e tendo as k-1 primeiras derivadas contínuas. Em função das imposições adicionais, em cada caso, a família de curvas spline ganha nomes particulares: spline natural, spline cúbica, spline bi-cúbica, B-spline, etc (Cintra, 1985).

As splines são curvas ajustadas por funções polinomiais com continuidade C^o, C^1 e C^2, que passa por pontos definidos pelo usuário.

As curvas B-spline aproximam um conjunto de n+1 pontos de controle ($P_0,...,P_n$, $n \geq 3$) por um conjunto de n-2 segmentos de curva cúbicos ($Q_3,...,Q_n$). Cada segmento de curva Q_i tem uma gama de valores de $t_i \leq t < t_{i+1}$, e para cada $i \geq 4$, há um ponto de junção (nó) entre os segmentos Q_{i-1} e Q_i, para o valor t_i.

Seja t uma entrada e seja o espaço da entrada t o intervalo $[t_o, t_p]$. As funções da classe B-

spline podem ser unicamente parametrizadas através dos extremos (pontos de fronteira) dos sub-intervalos decorrentes da divisão do espaço de entrada. Estes parâmetros são designados por nós.

Sejam os nós dados por t_0, t_1, ..., t_p e seja k a ordem das funções B-spline. As funções B-spline, normalizadas são dadas pela seguinte expressão analítica:

$$N_{i,k}(t) = \begin{cases} 1 \text{ se } t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0 \text{ se outros casos} \end{cases} \qquad \text{para } k = 1$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \qquad \text{para } k > 1 \qquad (3)$$

com i=0, 1, ..., m-k, isto é, para p intervalos entre os nós e para funções de ordem k, há m-k funções B-spline.

2.3.2 Funções que interpolam a partir de pontos discretos

Estas funções são baseadas na média ponderada e dependendo dos tipos de ponderadores adotados podem ser grupadas em duas categorias:

- ponderadores determinísticos; e

- ponderadores estocásticos.

2.3.2.1 Ponderadores determinísticos

As funções que interpolam a partir de pontos discretos são baseadas na média ponderada. A função mais aplicada neste caso é o método da distância inversa ponderada que aproxima a superfície por uma função F(X,Y). Segundo Pettinati (1983) apud Mitishita (1997), tem-se:

$$F(X,Y) = \frac{\sum_{k=1}^{n} \omega_k \cdot f(k)}{\sum_{k=1}^{n} \omega_k} \quad , \text{ para } (X,Y) \neq (X_k, Y_k) \qquad (4)$$

$$F(X,Y)=f(k) \quad , \text{ para } (X,Y)=(X_k,Y_k)$$

$$\omega_k = d_k^{\mu}$$

$$d_k = \sqrt{(X - X_k)^2 + (Y - Y_k)^2}$$

O valor de μ geralmente é tomado como sendo igual a –2, entretanto em muitos casos utiliza-se μ=-4, pois nem sempre o valor –2 é adequado, por atribuir influência grande nos pontos afastados.

Um dos inconvenientes desta metodologia é o aparecimento de áreas planas ao redor de cada ponto amostrado. Isto se dá pelo fato das derivadas de primeira ordem da função em relação a X e Y serem iguais a zero.

Este problema pode ser atenuado com a utilização do seguinte modelo alternativo:

$$F(X, Y) = \frac{\sum_{k=1}^{n} \omega_k \cdot L(k)}{\sum_{k=1}^{n} \omega_k} \quad , \text{para } (X, Y) \neq (X_k, Y_k) \qquad (5)$$

$$F(X, Y) = f(k) \text{ , para } (X, Y) = (X_k, Y_k) \qquad (6)$$

$$L(k) = f(k) + \delta f / \delta X|k \cdot (X - X_k) + \delta f / \delta Y|k \cdot (Y - Y_k)$$

Os valores das derivadas parciais da função em relação a X e Y nos pontos amostrados, devem ser obtidos por um procedimento aproximativo. O mais empregado é o de ajustar pelo Método dos Mínimos Quadrados uma superfície quadrática no ponto K e pontos vizinhos a este, e utilizar as derivadas parciais deste modelo.

Os métodos locais trabalham com um número de pontos que definem uma pequena área de ação do algoritmo de interpolação. Uma alteração qualquer nos

pontos modifica somente a vizinhança desta área. A dificuldade neste método está em definir adequadamente os limites desta vizinhança.

Segundo Mitishita (1997), um dos algoritmos mais empregados para a interpolação nos procedimentos locais é o que utiliza técnicas de elementos finitos, conhecido como método de interpolação de Akima. Consiste em aproximar as células de um modelo digital triangular, por um polinômio bivariado de quinto grau.

$$Z(x, y) = \sum_{i=0}^{5} \sum_{j=o}^{5-i} a_{ij} x^i y^j \qquad (7)$$

Este polinômio possui 21 (vinte e um) parâmetros que são determinados, inequivocamente com a resolução de um sistema de equações, com informações somente do triângulo em que o ponto a interpolar está contido. Estas informações são obtidas da seguinte forma:

Para cada ponto do triângulo tem-se a altura Z e as derivadas parciais $\partial Z/\partial X$, $\partial Z/\partial Y$, $\partial Z^2/\partial X^2$, $\partial Z^2/\partial Y^2$, $\partial Z^2/\partial XY$, resultando 18 (dezoito) equações. As três restantes, necessárias para a resolução do sistema, são obtidas pela derivada normal $\partial Z/\partial n$, relativas ao ponto central de cada lado do triângulo.

O ponto básico neste método está em como estimar as derivadas parciais da superfície em cada ponto do triângulo. Pettinatti (1983), recomenda que sejam estimadas a partir de superfícies quádricas, ajustadas por M.M.Q., nos pontos mais próximos de cada vértice e, no caso das derivadas normais, que as mesmas sejam aproximadas por uma função cúbica ao invés de serem calculadas explicitamente.

2.3.2.2 Ponderadores estocásticos

Estes ponderadores são obtidos levando-se em consideração conceitos de estatística e geoestatística, como a Krigagem.

O termo Krigagem é derivado do nome de Daniel G. Krige, que foi o primeiro a introduzir o uso de médias móveis em mineração.

Segundo Camargo(1997), na Krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, com exceção dos pesos, que neste caso, são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Alem disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima, sendo a sua

aplicação particularmente indicada para modelar as características do solo.

3. CONTROLE DE QUALIDADE

Para a realização de análise, tanto quantitativa quanto qualitativa dos MDTs, é necessário que sejam feitas algumas considerações sobre os documentos que estabelecem normas para a classificação dos produtos cartográficos.

A classificação de documento cartográfico deve ser realizada obedecendo-se as normas ditadas pelo Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984, Padrão de Exatidão Cartográfica.

O Decreto Lei 89.817 apresenta no Capítulo II, artigos 8° e 9°, as normas que estabelecem a forma de classificar um documento cartográfico segundo sua qualidade geométrica.

"Art. 8: As cartas, quanto à exatidão, devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica, segundo o critério indicado:

a. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica-Planimétrico-estabelecido.

b. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica-altimétrico-estabelecido.

Parágrafo Primeiro: Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico por dispersão, relativo a 90% (noventa por cento) de probabilidade, que define a exatidão dos trabalhos cartográficos.

Parágrafo Segundo: A probablidade de 90% (noventa por cento) corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão-PEC=1,6449EP.

Parágrafo Terceiro: O Erro Padrão isolado num trabalho cartográfico não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

Parágrafo Quarto: Para efeito das presentes instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro Padrão, Desvio Padrão e Erro Médio Quadrático.

Art. 9: As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas classes A, B e C, segundo os seguintes critérios:

a. Classe A

– Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico: 0,5mm na escala da carta, sendo de 0,3mm na escala da carta o Erro Padrão correspondente.

– Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico: metade da eqüidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro Padrão correspondente.

b. Classe B

- Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico: 0,8mm na escala da carta, sendo de 0,5mm na escala da carta o Erro Padrão correspondente.

– Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico: três quintos da eqüidistância entre as curvas de nível, sendo de dois quintos desta equidistância o Erro Padrão correspondente.

c. Classe C

- Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico: 1,0mm na escala da carta, sendo de 0,6mm na escala da carta o Erro Padrão correspondente.

– Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico: três quartos da eqüidistância entre as curvas de nível, sendo a metade desta equidistância o Erro Padrão correspondente.”

Segundo Leal e Dalmolin(1999), pode-se avaliar através da análise da precisão e da exatidão.

3.1 Análise da exatidão e da precisão

A análise da exatidão é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas no modelo e as coordenadas de referência.

Para a análise da exatidão utilizar-se da estimativa intervalar dada pela distribuição t de Student, sendo particularmente válida para amostras pequenas (até 30 pontos).

A análise consiste em construir um intervalo de confiança de 90% de certeza para a média populacional μ a partir da média amostral $\bar{x}$ e da variância amostral S^2, dada por:

$$\mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha})\left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right) \qquad (8)$$

onde:

μ = média populacional

$\bar{x}$ = média amostral

S = desvio padrão amostral

n = tamanho da amostra

Em seguida, aplica-se um teste de hipótese com nível de significância de 10%, para validação da exatidão, confrontando:

$H_0 : \mu \leq x$, contra

$H_1 : \mu > x$

onde x é o erro máximo admissível em acurácia.

O cálculo da estatística é dado por:

$$t = \frac{\left(\bar{x} - \mu_0\right)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \qquad (9)$$

onde μ_0 é a média populacional esperada e t é a estatística amostral, que deve ser verificada com o valor de t_α tabelado da distribuição t de Student. A estatística t amostral não satisfazendo a desigualdade $t<t_\alpha$ rejeita-se a hipótese nula.

Para a realização da análise da precisão, que é a coerência interna dos elementos do MDT, pode-se utilizar da distribuição Qui-quadrado χ^2 que consiste em construir um intervalo de confiança de 90% para o desvio padrão populacional S a partir do desvio padrão amostral s.

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)\cdot s^2}{\chi^2_{1-\alpha}}} \qquad (10)$$

onde σ é o desvio padrão estimado da população e $\chi^2_{1-\alpha}$ que se obtem da tabela da distribuição Qui-quadrado, onde o argumento é o grau de liberdade associado à certa probabilidade α.

Posteriormente aplica-se um teste de hipótese com nível de significância de 10%. Para validação da precisão, formula-se a seguinte hipótese:

$H_0 : \sigma^2 \leq x^2$, contra

$$H_1 : \sigma^2 > x^2$$

onde, x são os erros máximos admissíveis (desvio padrão) em precisão.

Calculada a variância σ^2 da população estimada, determina-se a estatística que é dada por:

$$\chi^2 = \frac{(n-1)\cdot s^2}{\sigma_0^2} \qquad (11)$$

e verifica-se se o valor está no intervalo de aceitação, ou seja:

$$\chi^2 \leq \chi^2_{1-\alpha} \qquad (12)$$

Ainda, para a realização de análise estatística de documentos cartográficos, Galo e Camargo(1994), apresentam outra proposta, como segue, fazendo-se a análise de tendências e de precisão.

3.2 Análise de tendências e precisão

A exatidão do documento cartográfico é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas no documento e as suas homólogas de referência.

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r \tag{13}$$

A média e o desvio padrão, calculados como segue:

$$\Delta X_i = X_i^r - X_i^c$$

onde X_i^r são as coordenadas de referência e X_i^c são as coordenadas dos modelos.

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta X_i \tag{14}$$

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \left(\Delta X_i - \overline{\Delta X}\right)^2 \tag{15}$$

No teste de tendência são avaliadas as hipóteses:

H_0: $\overline{\Delta X} = 0$, contra

H_1: $\overline{\Delta X} \neq 0$

Calcula-se a estatística amostral t, e verifica-se se o valor encontra no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula.

O valor de t amostral é calculado por:

$$t_X = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \qquad (16)$$

e o intervalo de confiança é dado por:

$$|t_X| < t_{(n-1;\alpha/2)}$$

A estatística t não satisfazendo a desigualdade, rejeita-se a hipótese nula, que significa que o documento não está livre de tendência.

Para verificar a precisão, a análise é realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o desvio padrão esperado para a classe desejada, formulando-se a seguinte hipótese:

$$H_0 : S_X^2 = \sigma_X^2 \text{ , contra}$$

$$H_1 : S_X^2 > \sigma_X^2$$

onde, σ_X é o desvio padrão esperado para a classe de interesse.

Calculado o desvio padrão esperado, realiza-se a estatística através da expressão:

$$\chi_X^2 = (n-1)\frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \qquad (17)$$

e verifica-se se o valor está no intervalo de aceitação, como segue:

$$\chi^2_X \leq \chi^2_{(n-1;\alpha)}$$

Não sendo obedecida, rejeita-se a hipótese H_0.

3.3 Tamanho da amostra

Da teoria estatística, pode-se afirmar que o tamanho da amostra, necessária para um dado grau de acurácia requerido para o modelo a ser analisado, depende da variação associada com a variável aleatória, isto é, no caso de testes de acurácia de MDT, o desnível. Para uma pequena variação, o menor tamanho de amostra que é necessário para obter um dado grau de acurácia requerida para a sua estimativa.

O tamanho mínimo da amostra necessária depende também do grau de acurácia desejada.

Fazendo com que M seja a média de uma amostra aleatória de tamanho n de uma distribuição particular, e u o valor verdadeiro da variável aleatória, a razão

$$\gamma = \frac{M - u}{\frac{SD}{\sqrt{n}}} \qquad (18)$$

é a variável padronizada e tem aproximadamente a distribuição normal N(0,1), mesmo com uma distribuição básica não normal, contanto que o tamanho da amostra seja suficientemente grande.

Sendo o desvio padrão de uma distribuição conhecida mas o valor de u (valor verdadeiro da variável aleatória) desconhecido, para uma probabilidade r e para um valor suficientemente grande de n, um valor de z pode ser obtido da tabela estatística para N(0,1), distribuição tal que a probabilidade que γ estará no limite entre –Z e Z é aproximadamente igual a r; ou matematicamente

$$P(-Z \leq \gamma \leq Z) \cong r \qquad (19)$$

Substituindo a equação (18) na equação (19), pode-se obter a seguinte expressão:

$$P(M\text{-}Z.SD/n^{1/2} \leq u \leq M + Z.SD/n^{1/2}) \cong r \qquad (20)$$

Para um valor constante S, o intervalo aleatório M±S, incluindo u, é o intervalo de confiança,

onde S é o grau de acurácia especificado para a média estimada, M neste caso, e é dado por

$$S = Z.SD/n^{1/2}$$

Para a análise estatística de MDT, pode-se obter o tamanho da amostra, utilizando-se de uma amostra inicial de um tamanho qualquer (por exemplo 5 ou 10), com a seguinte expressão (Li,1991):

$$n = \frac{Z_r^2 \cdot SD^2}{S^2} \qquad (21)$$

onde:

SD é o desvio padrão da amostra inicial;

S é o grau de acurácia para a média estimada; e

Z_r obtido da tabela estatística da distribuição normal, para uma dada probabilidade r.

O desvio padrão da variável aleatória da expressão 30, é obtido de uma amostra inicial, para a partir desta calcular o tamanho da amostra necessária para a avaliação do modelo. Sendo o valor calculado menor que o tamanho da amostra utilizado, significa que

esta é suficientemente grande para uma análise adequada.

4. MÉTODOS DE LEVANTAMENTO

A coleta de dados pode ser realizada através de levantamentos clássicos, utilizando-se de instrumentos topográficos e também por meio de receptores GPS, que invariavelmente estarão referenciados a um determinado sistema de coordenadas.

4.1 Sistema de Coordenadas

A atividade de posicionamento, seja geodésico ou topográfico, deve estar relacionado a um sistema de referência, definido e realizado.

4.1.1 Sistema de Coordenadas Cartesianas

Num sistema de coordenadas cartesiano com eixos X, Y e Z, a posição de um ponto P é determinado pelo vetor posição, como mostra a figura 1.

O vetor X_p é representado por:

$$X_p = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} ,$$

onde x_p, y_p e z_p são as coordenadas do ponto.

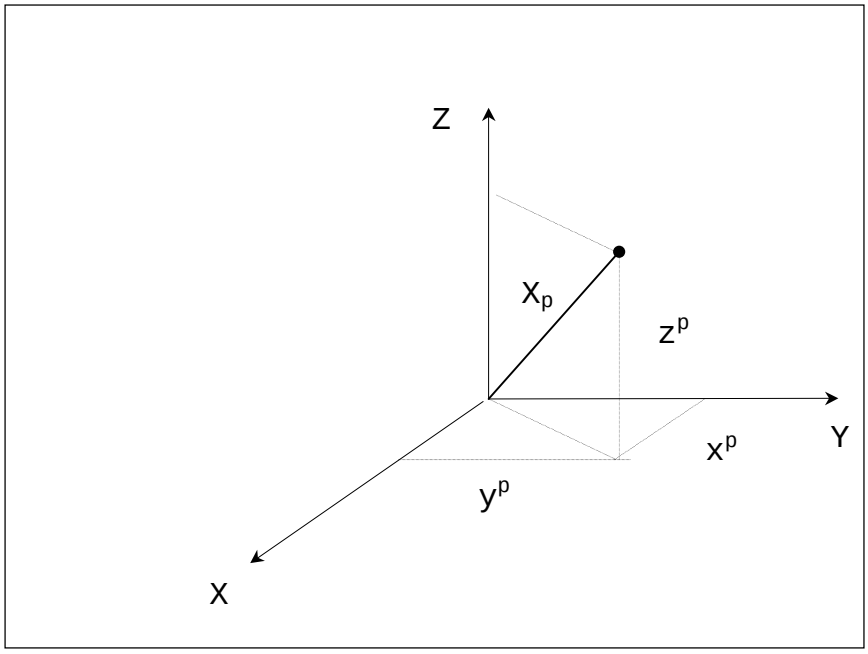


Figura 1 – Sistema de coordenadas cartesianas.

4.1.2 Coordenadas Geodésicas

As coordenadas geodésicas são baseadas em um elipsóide de revolução com centro na origem e tendo como eixo de rotação o eixo menor, latitude (φ), longitude (λ) e a altura geométrica (h), ilustrados na figura (2).

A latitude φ de um ponto P é o ângulo entre a normal ao elipsóide passando pelo ponto P e sua projeção sobre o plano do equador; a longitude λ de P é o ângulo diedro entre o meridiano origem (de Greenwich) e o do ponto P, e h é a distância da superfície do elipsóide até o ponto.

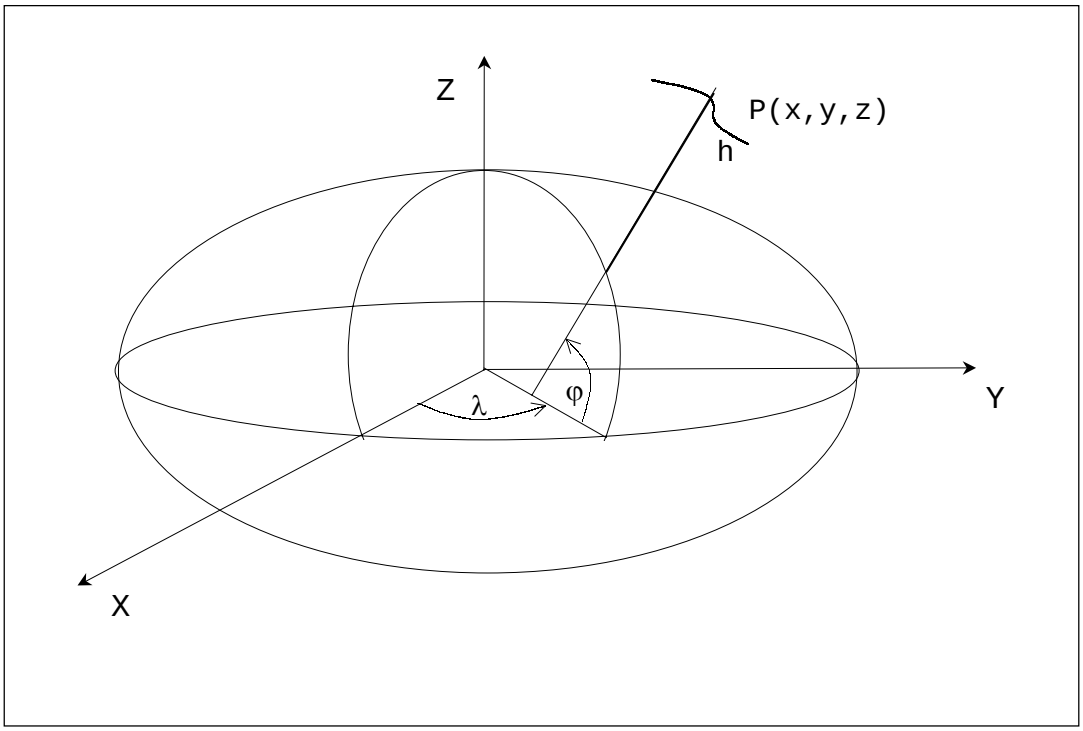


Figura 2 – Sistema de coordenadas geodésicas

A relação entre as coordenadas geodésicas e as cartesianas geodésicas é dada por:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N + h)\cos\varphi\cos\lambda \\ (N + h)\cos\varphi\,\mathrm{sen}\,\lambda \\ ((1 - e^2)N + h)\mathrm{sen}\,\varphi \end{pmatrix} \qquad (22)$$

onde N é o raio de curvatura da primeira vertical ou grande normal no ponto considerado, definido como:

$$N = \left(\frac{a}{\sqrt{1 - e^2\,\mathrm{sen}^2\,\varphi}} \right) \qquad (23)$$

sendo e a primeira excentricidade, expressa por:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \qquad (24)$$

e o achatamento f, expresso por:

$$f = \frac{a - b}{a} \qquad (25)$$

4.1.3 Sistema de Referência WGS-84

O referencial adotado para o GPS é o World Geodetic System 1984 (WGS-84), com origem no centro de massa da Terra, os eixos cartesianos Z orientado para o *IERS Reference Pole* (IRP), que corresponde à direção definida pelo CTP, época 1984, com incerteza de 0,005”, o eixo X é definido pela intersecção do *IERS Reference Meridian* (IRM), que coincide com o *BIH Zero Meridian* (época 1984,0), com incerteza de 0,005”, e o plano passante pela origem é normal ao eixo Z; o eixo Y, completa o sistema dextrógiro, como mostra a figura 3. O elipsoide de referência é o GRS80, um elipsoide de revolução (Monico, 2000).

Os parâmetros fundamentais do WGS 84 estão listados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do Elipsoide do WGS 84 (Monico, 2000)

Parâmetro e valor	Descrição
a = 6.378.137 m	Semi-eixo maior
f = 1/298,2572221	Achatamento
ϖ_e = 7292115. 10^{-8} rad/s	Velocidade angular da Terra
GM = 3986005. 10^8 m^3/s^2	Constante gravitacional da Terra

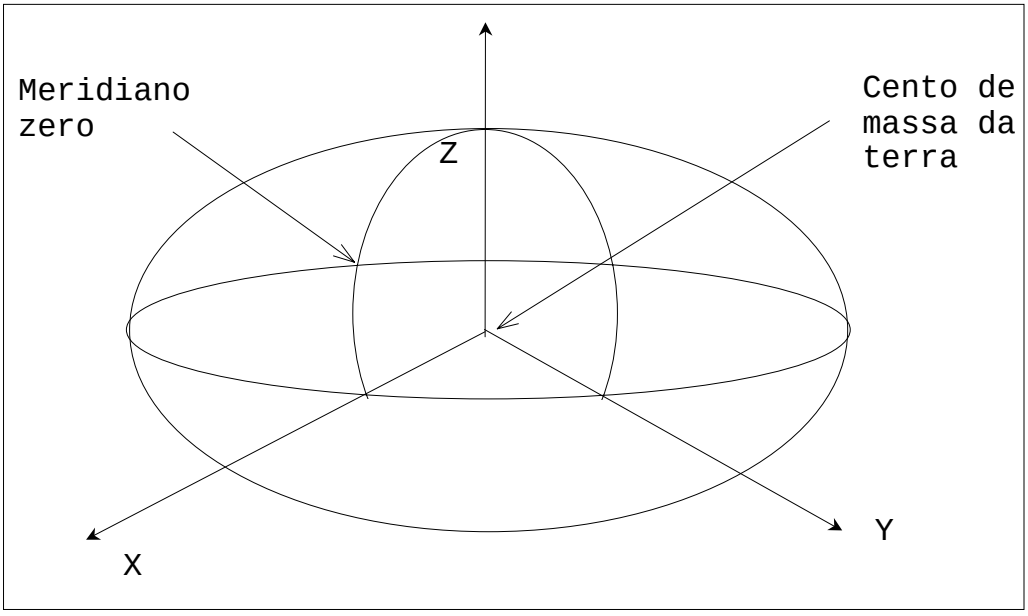


Figura 3 – Esquema do Sistema de Referência WGS 84.

As atividades práticas ligadas à cartografia, geralmente, têm as altitudes vinculadas ao campo de gravidade da Terra (altitude ortométrica), e a altitude proporcionada pelo GPS é de natureza geométrica. Embora sejam diferentes, pode-se obter a

altitude ortométrica (H), com boa aproximação, a partir da geométrica (h) determinadas com o GPS, conhecendo-se a ondulação geoidal (N), de forma simplificada, através da seguinte expressão:

$$H \cong h - N \qquad (26)$$

h é a altura geométrica, medida sobre a normal ao elipsóide, da superfície física ao elipsóide.

H é a altitude ortométrica, medida sobre a vertical ao geóide, da superfície física ao geóide.

N é a ondulação geoidal.

A figura 4 mostra as três superfícies usadas em geodésia.

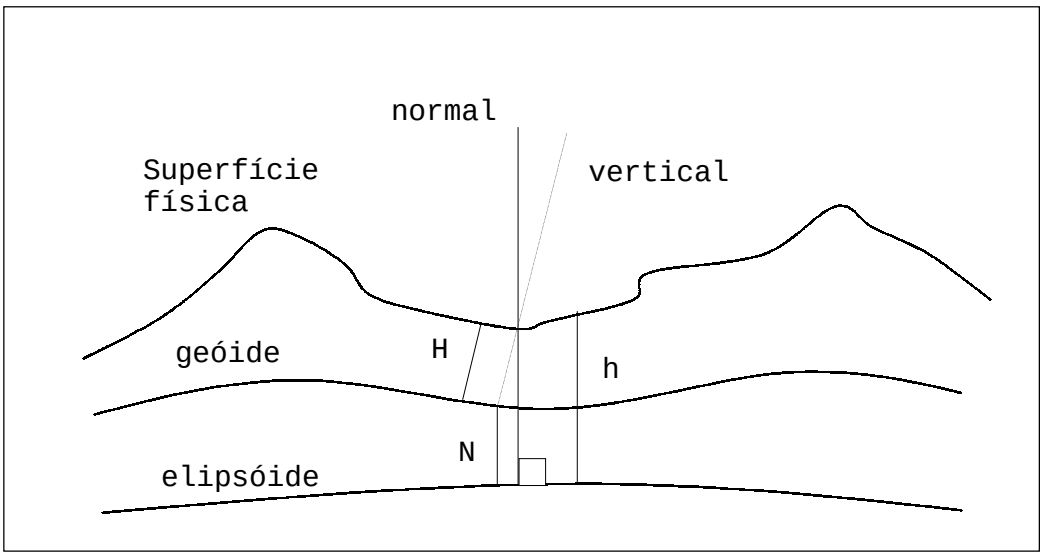


Figura 4 – Esquema das três superfícies.

4.1.4 Sistema Geodésico Brasileiro

O Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) tem a sua definição, implantação e manutenção sob a responsabilidade a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A imagem geométrica da Terra, para o SGB, é definida pelo Elipsoide de Referência Internacional de 1967, aceito pela Assembléia Geral da Associação Geodésica Internacional, realizada em Lucena em 1967; cujos parâmetros definidores são:

- semi eixo maior a=6.378.160 m;
- achatamento f=1/298,25.

O referencial altimétrico coincide com a superfície equipotencial que contém o nível médio do mar, definido pelas observações maregráficas tomadas na baia de Imbituba, no litoral do Estado de Santa Catarina.

O atual Sistema Geodésico Brasileiro integra o Sul-americano de 1969 (SAD-69), tendo por origem topocêntrica o vértice de CHUÁ (MG).

As coordenadas dos vértices do SGB a serem utilizadas como estações com coordenadas conhecidas,

para dar suporte às atividades com GPS, devem ser transformadas para WGS 84. Assim, os pontos levantados com GPS terão suas coordenadas referenciadas ao WGS 84, necessitando de uma transformação para o SAD 69, para serem utilizadas em atividades que requeiram coordenadas. No Brasil, os parâmetros de transformação do WGS 84 para o SAD 69 determinados pelo IBGE por ter assumido que os dois sistemas são paralelos e com mesma escala, se resumem em três translações:

Tx=66,87 m ; Ty=-4,37 m e Tz=38,52 m.

4.2 Levantamento com GPS

O GPS é um sistema de posicionamento por radio-navegação de abrangência global, permitindo ao usuário, em qualquer parte da superfície da terra, ou próximo à ela, ter à sua disposição pelo menos 4 satélites para serem rastreados.

O segmento espacial do sistema é composto de 24 satélites, distribuídos em 6 planos orbitais igualmente espaçados com 4 satélites em cada plano, numa altitude de aproximadamente 20.200 Km. Estes planos orbitais estão inclinados de 55^{o} em relação ao Equador com um período de aproximadamente 12 horas

siderais. Na figura 5 está representado o segmento espacial do GPS.

O posicionamento por GPS, poderá ser realizado no modo absoluto ou relativo.

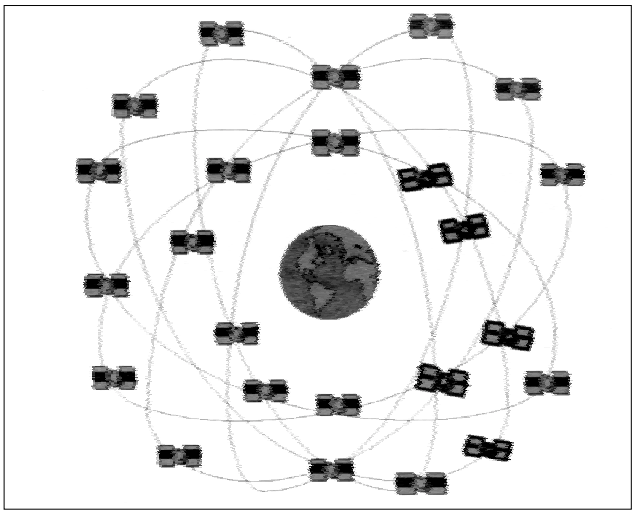


Figura 5 – Constelação dos satélites GPS (Monico, 2000)

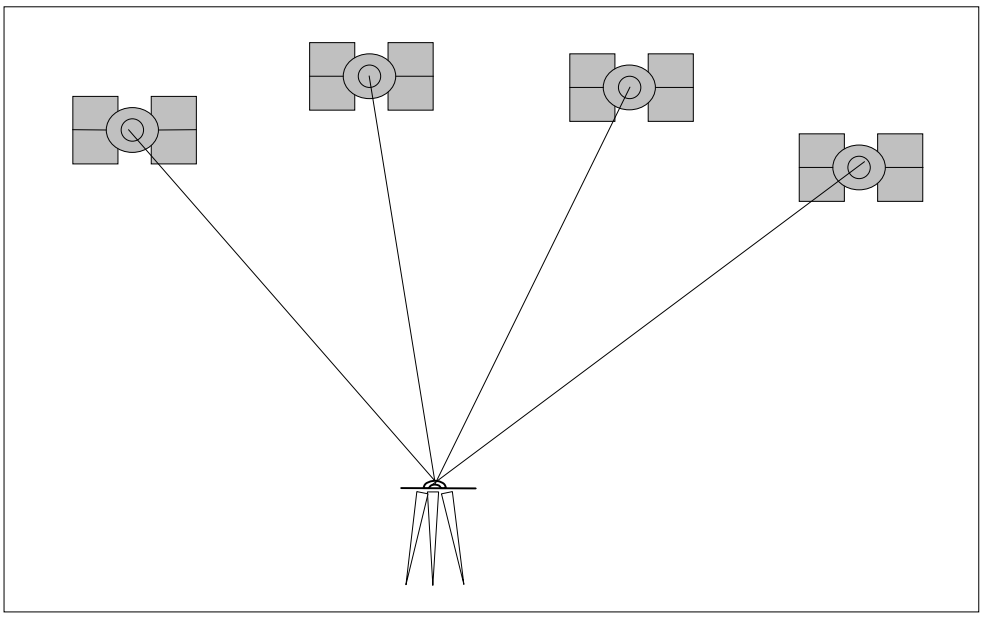


Figura 6 – Posicionamento por ponto.

No posicionamento absoluto, representado na figura 6, o usuário necessita apenas de um receptor para a determinação da posição do ponto, sendo esta, frequentemente utilizada em navegação de baixa precisão e levantamentos expeditos.

No posicionamento relativo, ilustrado na figura 7, deve-se ter pelo menos dois receptores. Porém, com o Sistema de Controle Ativo (SCA), com apenas um receptor poderá efetuar o posicionamento relativo. Para tanto, o usuário deverá ter acesso a dados de uma ou mais estações pertencentes ao SCA.

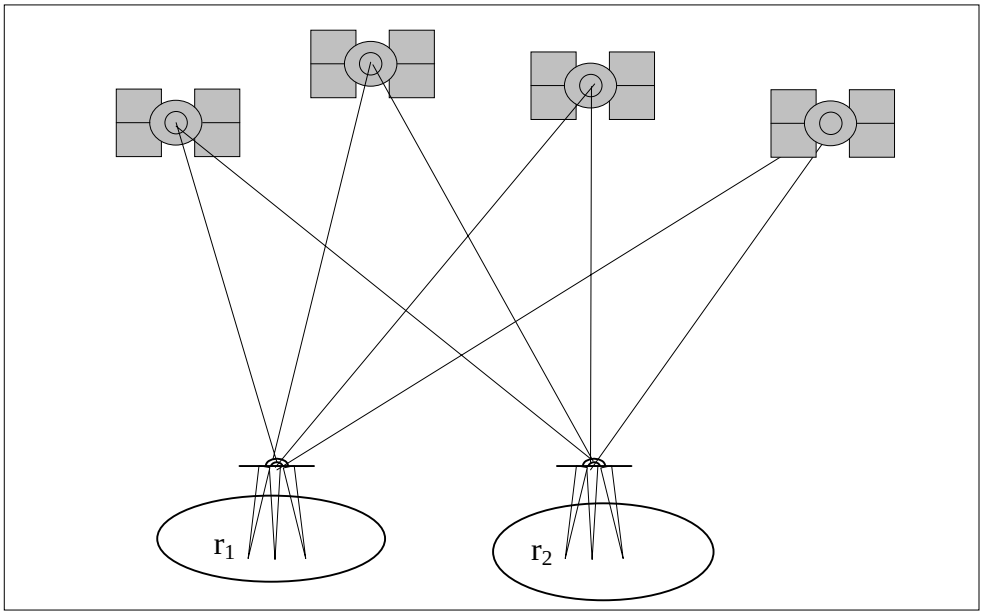


Figura 7 – Posicionamento relativo

Há vários métodos de posicionamento relativo, entre eles, tem-se o posicionamento estático, estático rápido, semicinemático e cinemático.

O princípio fundamental do posicionamento relativo, é que os receptores envolvidos rastreiem, simultaneamente, um conjunto de pelo menos dois satélites comuns (Monico, 2000).

Para a realização do posicionamento relativo estático, os receptores devem rastrear simultaneamente os satélites visíveis por um período de tempo que pode variar de 20 minutos a até algumas horas.

Neste método de posicionamento, pode-se obter precisão da ordem de 1,0 a 0,1 ppm ou melhor. Porém, em redes geodésicas com linhas de base maiores que 10 a 15 Km, é imprescindível o uso de receptores de dupla frequência para se obter precisão melhor que 1,0 ppm.

No posicionamento relativo estático rápido o princípio é semelhante ao relativo estático, diferindo apenas no período de ocupação da estação a determinar, não excedendo a 20 minutos. É um tipo de levantamento propício quando se almeja alta

produtividade em locais com muitas obstruções, podendo-se obter linhas de base de até 10 Km com precisão de 1 a 10 ppm. Neste método, um receptor serve de base, em uma estação de referência e outro percorre as de interesse, permanecendo cerca de 5 a 20 minutos para a coleta de dados. Durante o deslocamento entre as estações o receptor móvel poderá ser desligado.

No posicionamento relativo semicinemático coletam-se dados por pelo menos dois curtos períodos de tempo na mesma estação. As coletas devem estar separadas por um intervalo de tempo de 20 a 30 minutos para proporcionar alteração na geometria dos satélites. Durante esse intervalo pode-se ocupar outras estações, devendo manter continuamente o receptor rastreando os mesmos satélites, exigindo, portanto, que seja tomado muito cuidado no planejamento do levantamento.

O princípio do método de posicionamento relativo cinemático é um receptor ocupar uma estação conhecida enquanto o outro percorre as feições de interesse.

Além desses métodos de posicionamento, o usuário pode dispor do GPS diferencial, o DGPS, que foi desenvolvido com a finalidade de reduzir os efeitos da

disponibilidade seletiva, imposta ao modo absoluto. Sua utilização original foi na navegação, mas atualmente pode ser empregada em várias atividades.

Para a realização de levantamentos com DGPS, deve-se ter um receptor estacionário numa estação conhecida, que rastreie todos os satélites visíveis. No processamento, determinam-se as correções posicionais e as pseudo-distâncias e fase da portadora. O método mais utilizado, na prática, é o que utiliza a pseudo-distância, proporcionando uma precisão da ordem de 1 a 5 metros, podendo-se realizar posicionamento em tempo real, embora, possa ser pós-processado (Monico, 2000).

As correções posicionais determinadas, são transmitidas ao usuário para corrigir suas posições, como ilustra a figura 8.

Em quaisquer dos métodos de posicionamento com receptores GPS, não há limitação quanto à intervisibilidade das estações e nem quanto às condições climáticas e meteorológicas.

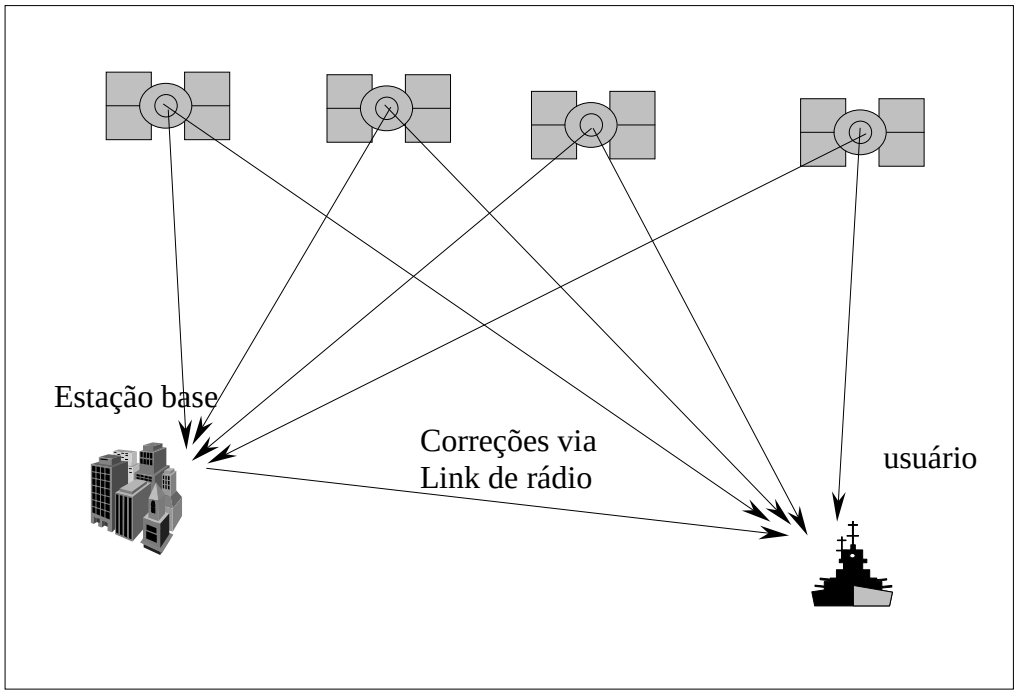


Figura 8 – Conceito de DGPS

4.3 Métodos Topográficos

Nos levantamentos convencionais com métodos e instrumentos topográficos, há certas limitações quanto ao seu uso quando comparados com levantamentos com GPS, como a necessidade de intervisibilidade entre estações, mas ainda são muito utilizados em levantamentos plano-altimétricos.

Nos levantamentos pelo processo convencional, utilizam-se usualmente dos métodos de poligonação e irradiação, e em alguns casos de

intersecção. Nas figuras 9, 10 e 11, têm-se esquemas de poligonação, irradiação e intersecção, respectivamente.

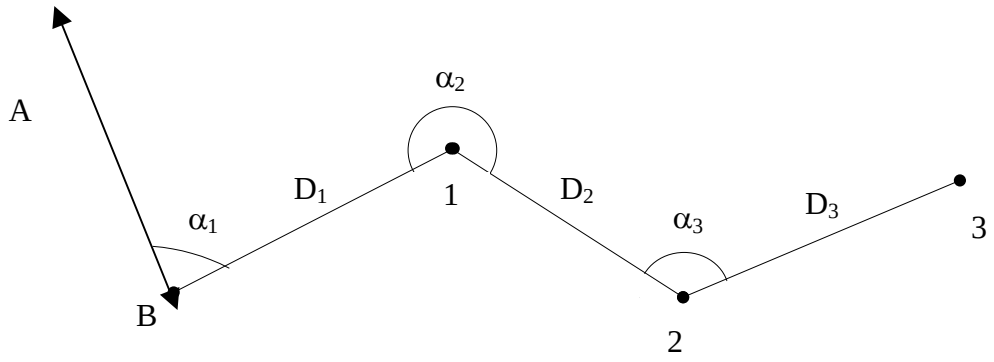


Figura 9 – Esquema de poligonal.

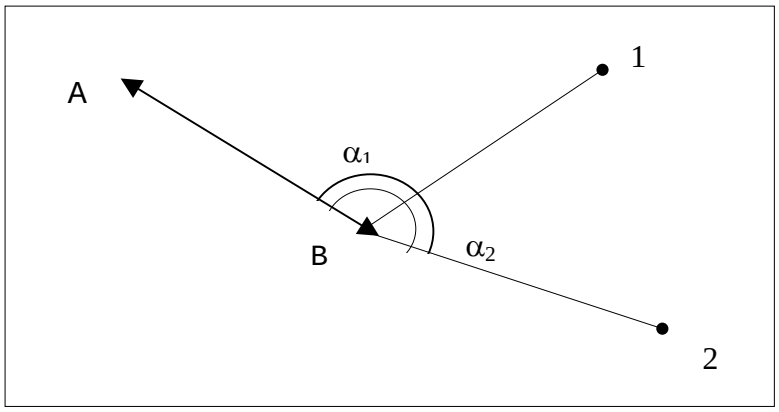


Figura 10 – Esquema de irradiação.

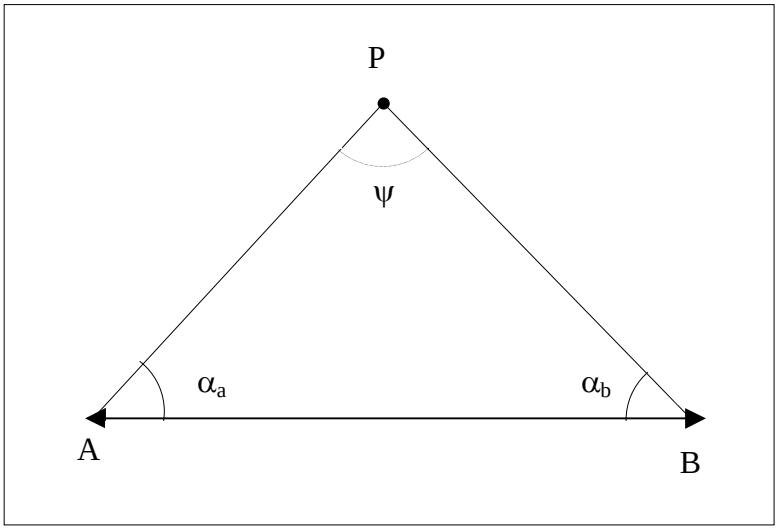


Figura 11 – Esquema de intersecção.

Em trabalhos que exigem precisão em levantamentos altimétricos, estes devem ser realizados com a utilização de equipamentos e métodos apropriados para se que obtenha a precisão desejada. Nestas circunstâncias, utiliza-se de níveis de luneta para a realização de nivelamento geométrico com visadas iguais para a obtenção dos desníveis entre os pontos de interesse.

Nos trabalhos, para a obtenção de plantas plano-altimétricas, usualmente se utiliza de instrumentos e processos de levantamento que não oferece grande precisão nos desníveis, porém, dão rendimentos muito maiores, é o caso de poligonação e irradiação, com nivelamento trigonométrico para a determinação da distância vertical.

Nas poligonações e irradiações, normalmente são utilizadas estações totais, que são instrumentos destinados a medição de ângulos e distâncias.

Nestes processos de levantamento, por quaisquer dos métodos, invariavelmente se cometem erros, por mais sofisticados e sensíveis que sejam os instrumentos e por maior que seja a habilidade do operador.

Os erros, inerentes a cada tipo de levantamento, são funções das características dos instrumentos utilizados e dos métodos envolvidos para alcançar os objetivos almejados.

Quando os levantamentos são realizados por irradiação, deve-se admitir que o erro planimétrico que se pode cometer pode ser obtido pela expressão:

$$E_{ir} \leq \sqrt{e_{\alpha a}^{2} + e_{L}^{2}} \qquad (27)$$

onde:

$E_{\alpha a}$ é o erro na irradiação;

$e_{\alpha a}$ é o erro angular azimutal;

e_{L} é o erro linear na medida da distância.

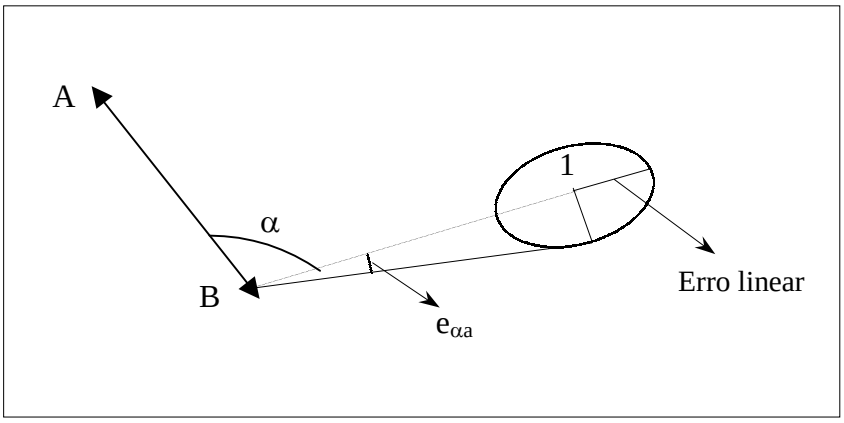


Figura 12 – Erro na irradiação.

Nos levantamentos pelo método de poligonação, os erros esperados podem ser calculados pela seguinte expressão:

$$E_P \leq \sqrt{E_t^2 + E_g^2} \qquad (28)$$

sendo que:

$$E_t \leq e_{\alpha a} \cdot D\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{6}}$$

$$E_g \leq \frac{e_L\sqrt{n}}{\sqrt{2}}$$

onde: E_t é o erro transversal

E_g é o erro longitudinal

n é o número de lances da poligonal

D é o comprimento médio dos lances.

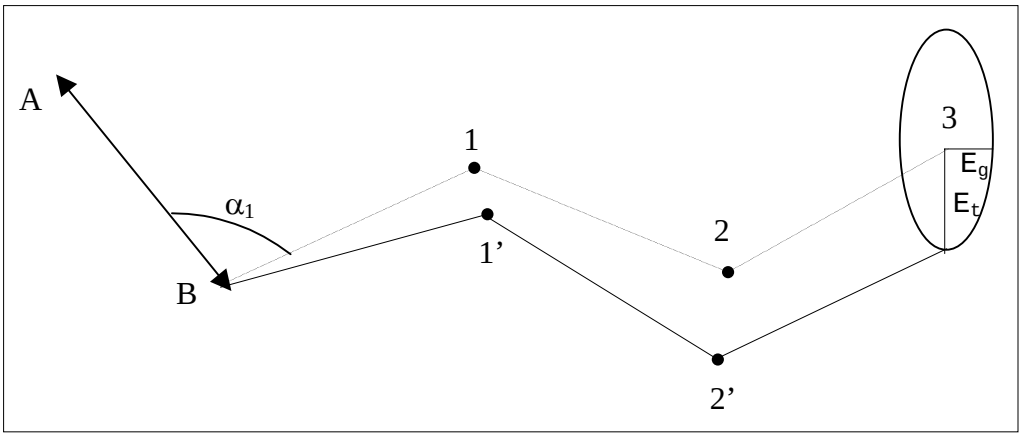


Figura 13 – Erro em poligonal.

Nas intersecções os erros podem ser determinados pela expressão:

$$E_{Int} \leq \frac{e_{\alpha a} \cdot D}{\text{sen}(0{,}5\psi)} \qquad (29)$$

onde ψ é o ângulo no ponto de intersecção.

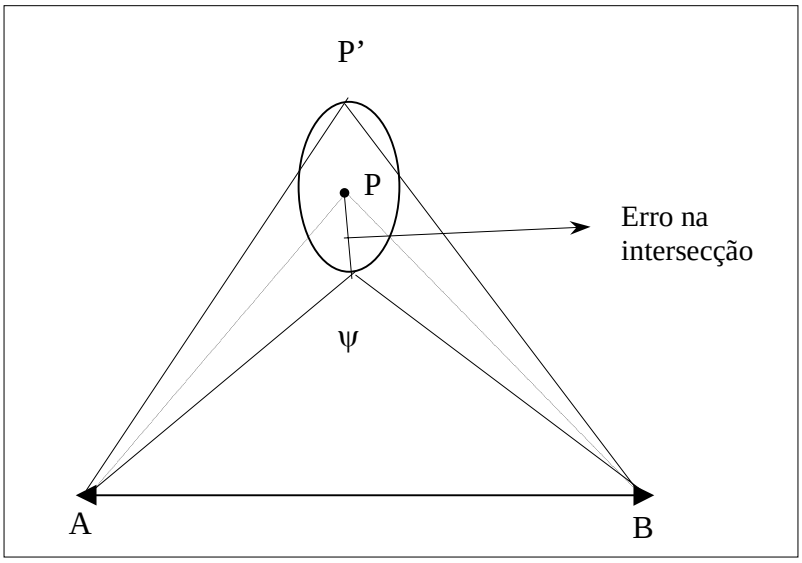


Figura 14 – Erro na intersecção.

Na determinação dos desníveis entre os pontos, quando realizados por nivelamento geométrico, os erros que se pode cometer, podem ser expressos como segue:

$$E_H \leq e_{\alpha z}.D \qquad (30)$$

onde $e_{\alpha z}$ é o erro que se comete na medida da distância zenital.

Nos levantamentos altimétricos realizados por nivelamento trigonométrico, os erros podem ser obtidos pela expressão:

$$E_H \leq \sqrt{E_h^2 + E_i^2 + E_o^2} \qquad (31)$$

onde:

E_i é o erro na altura do instrumento

E_o é o erro na altura do sinal

$E_h \leq D'.\tan(\beta') - D.\tan(\beta)$

D' é a distância eivada do erro linear

β é a inclinação da visada

β' é a inclinação da visada, eivada do erro angular.

5 DESENVOLVIMENTO

Os trabalhos foram desenvolvidos em uma área dentro do campus da FCT/Unesp, pela facilidade, e principalmente pela garantia na sua utilização em qualquer época para a coleta de dados para a execução das atividades.

Foram gerados M.D.Ts. utilizando-se de pontos amostrais coletados com distribuição de forma irregular, na área de estudo, utilizando-se de estações totais.

No teste experimental para a realização do controle de qualidade de modelos digitais de terreno, foi usado um conjunto de pontos de verificação, e admitiu-se que estes representam a altimetria verdadeira.

Selecionados os pontos de verificação, estes foram interpolados do M.D.T. e checados com os correspondentes pontos levantados no terreno, obtendo-se a diferença entre as duas alturas para cada ponto.

As diferenças entre as duas alturas dos pontos de verificação foram usadas para calcular os valores estatísticos, como a média e o desvio padrão para a medida de acurácia do M.D.T. Nestas

circunstâncias, a discrepância das diferenças de nível é considerada como uma variável aleatória.

5.1 Área de Estudo

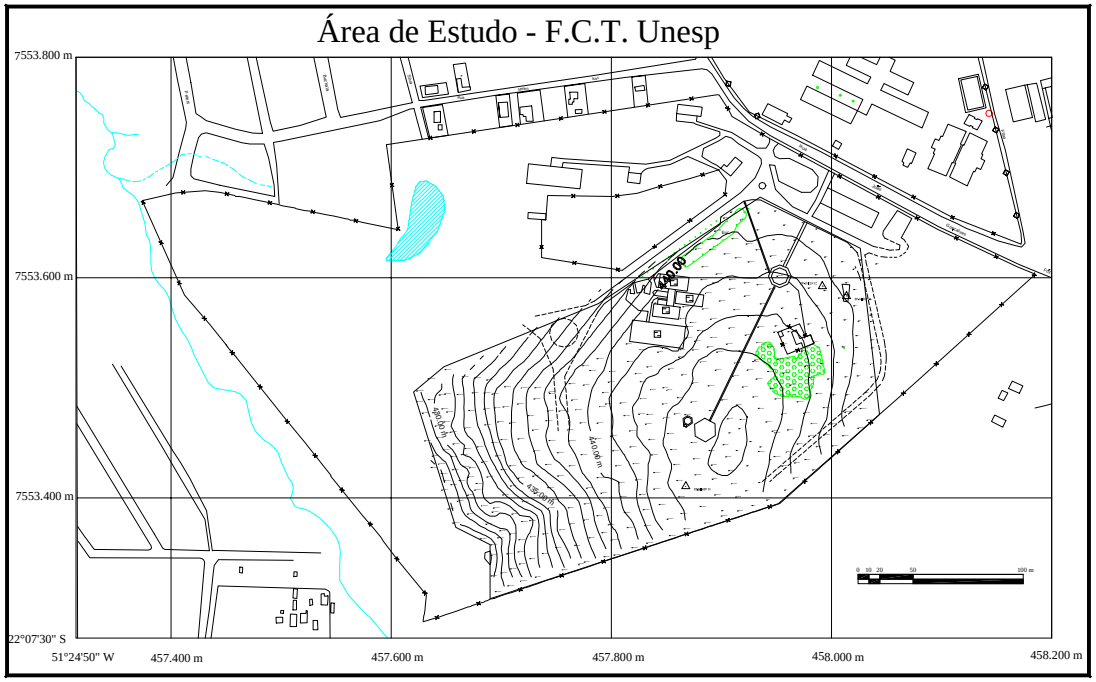


Figura 15 – Área de estudo e distribuição dos pontos amostrais

Utilizou-se para o presente estudo, levantamentos realizados em uma área do campus, onde o relevo apresenta características diversificadas. Esta

área abrange toda a porção Sul do campus, a partir do Docente III.

A área de estudo é delimitada por um polígono irregular abrangendo uma extensão de aproximadamente 7,5 hectares, e apresenta basicamente uma região com declividade de 3% e uma outra de 12%, aproximadamente, que pode ser visto na figura 16, obtida utilizando-se do programa Surfer com triangulação e interpolação linear.

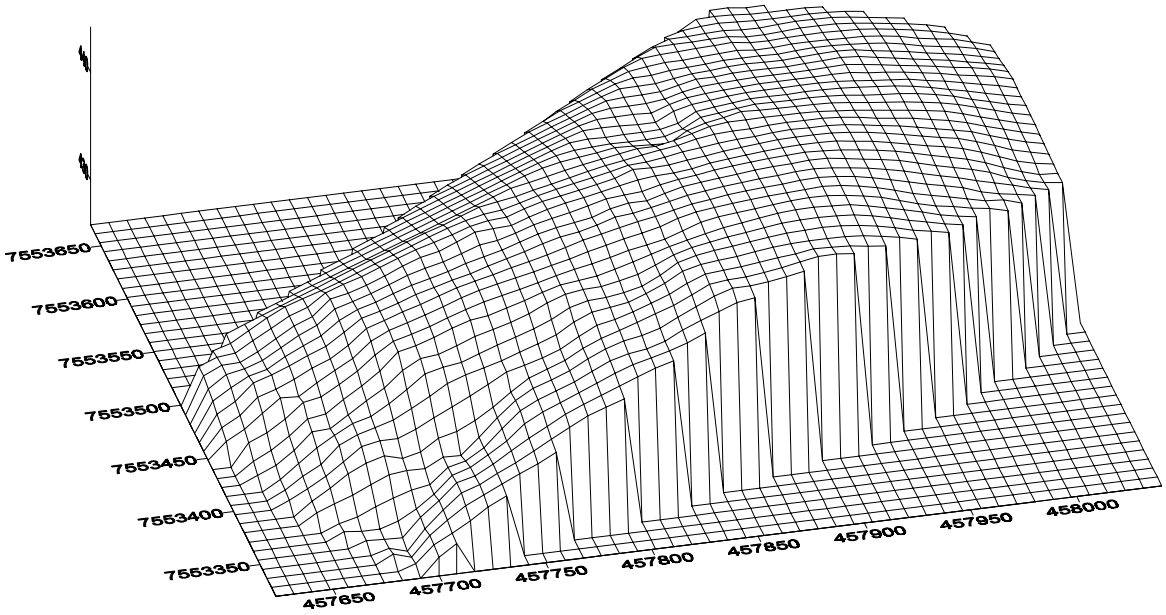


Figura 16 – Vista perspectiva da área de estudo

5.2 Equipamentos Utilizados

Os dados dos pontos amostrais foram coletados utilizando-se de estações totais. Utilizou-se também de um microcomputador IBM PC lotado no LATOGEO e programa de processamento.

As estações totais utilizadas apresentam as seguintes características:

- Estação Total Sokkia SET5-F

  Leitura Digital de 1”

  Precisão angular de 5”

  Precisão do distanciômetro de ±(5mm + 3ppm.D)

- Estação Total Sokkia SET2100

  Leitura digital de 0,5”

  Precisão angular de 2”

  Precisão do Distanciômetro de ±(2mm + 2ppm.D)

As coordenadas dos pontos amostrais foram calculadas com o programa Topograph.

5.3 Programa topoGRAPH

O topoGRAPH é um sistema para processamento de dados topográficos que executa as tarefas de armazenamento de dados levantados em campos e o processamento de cálculos topográficos, sendo subdividido em módulo básico, módulo gráfico e fundiário.

O módulo básico do sistema, apresenta os seguintes recursos:

- introdução de cadernetas completas e reduzidas;
- levantamentos feitos com taqueômetros, estações totais ou distanciômetros;
- controle de erros de caderneta de campo;
- cálculo de poligonais com diferentes sentidos de caminhamento;
- cálculo de poligonais fechadas e apoiadas;
- cálculo de irradiações;
- cálculo de nivelamento trigonométrico; e
- cálculo de intersecções.

A base de dados do módulo gráfico é composta pelos arquivos de pontos de coordenadas geradas no módulo básico e dos diversos aplicativos que

compõem o Sistema topoGRAPH. Os aplicativos deste sistema se dividem em quatro tipos básicos:

- poligonais calculadas;
- irradiações calculadas;
- pontos cadastrados ou importados; e
- pontos digitalizados.

Com as coordenadas calculadas, dos pontos que compõem o conjunto de dados amostrais, gera-se o desenho da planta e curvas de nível.

5.4 Coleta de Dados

Para a coleta dos dados, foram utilizados dois pontos; FCT03 e P6, com coordenadas no sistema UTM, e as altitudes ortométricas (medida sobre a vertical, do ponto sobre a superfície ao geóide). As coordenadas desses dois pontos foram determinadas pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), quando da reimplantação de vértices destruídos da poligonal fundamental.

As coordenadas E e N dos vértices foram determinadas por poligonação e a altitude geométrica, determinada por nivelamento trigonométrico.

As altitudes obtidas do nivelamento trigonométrico foram transformadas em altitudes ortométricas, com a ondulação geoidal que na área de estudo é de aproximadamente 0,4904 metros (Monico et al.,1996).

Na área de estudo adotou-se como sendo constante a ondulação geoidal, por ser suave o geóide na região (Monico et al., 1996).

Na tabela 2 encontram-se as coordenadas dos pontos FCT03 e P6, que para facilidade de manuseio das coordendas E e N foram subtraídos 450.000 e 7.550.000 metros, respectivamente.

Tabela 2 – Coordenadas dos pontos de referência

Ponto	E (m)	N (m)	H (m)
FCT03	7.850,6980	3.412,8420	444,337
P6	7.913,9720	3.389,4610	445,479

Os pontos amostrais foram medidos com distanciômetros eletrônicos, obtendo-se assim, coordenadas polares que foram transformadas posteriormente em coordenadas UTM (E, N e H).

A determinação das coordenadas dos pontos foi realizada aplicando-se os métodos de poligonação e irradiação.

Da poligonal básica (figura 17) com erro em planimetria de 0,037 m e em altimetria erro de fechamento de 0,035 m, foram feitas as irradiações aos pontos amostrais, obtendo-se assim, uma malha fina com pontos aleatórios, distribuídos em toda a região.

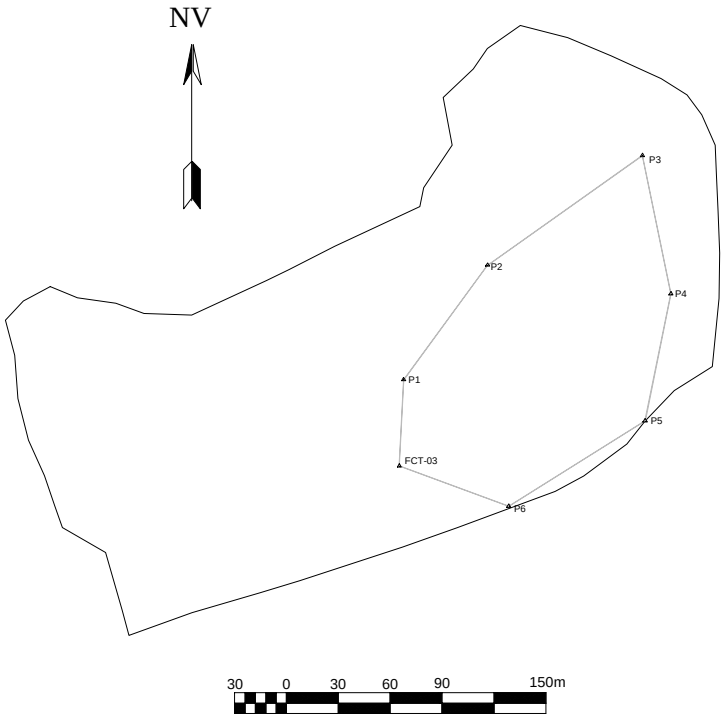


Figura 17 – Poligonal básica.

Nas irradiações, considerando o erro de 0,005m tanto na centragem do instrumento quanto do sinal, os erros planimétricos na determinação dos pontos amostrais são inferiores a 0,039m.

A malha definida e cujas coordenadas foram determinadas, abrangendo toda a área de estudo, apresenta um total de 425 pontos amostrais. Na figura 18 pode-se ver a distribuição destes pontos.

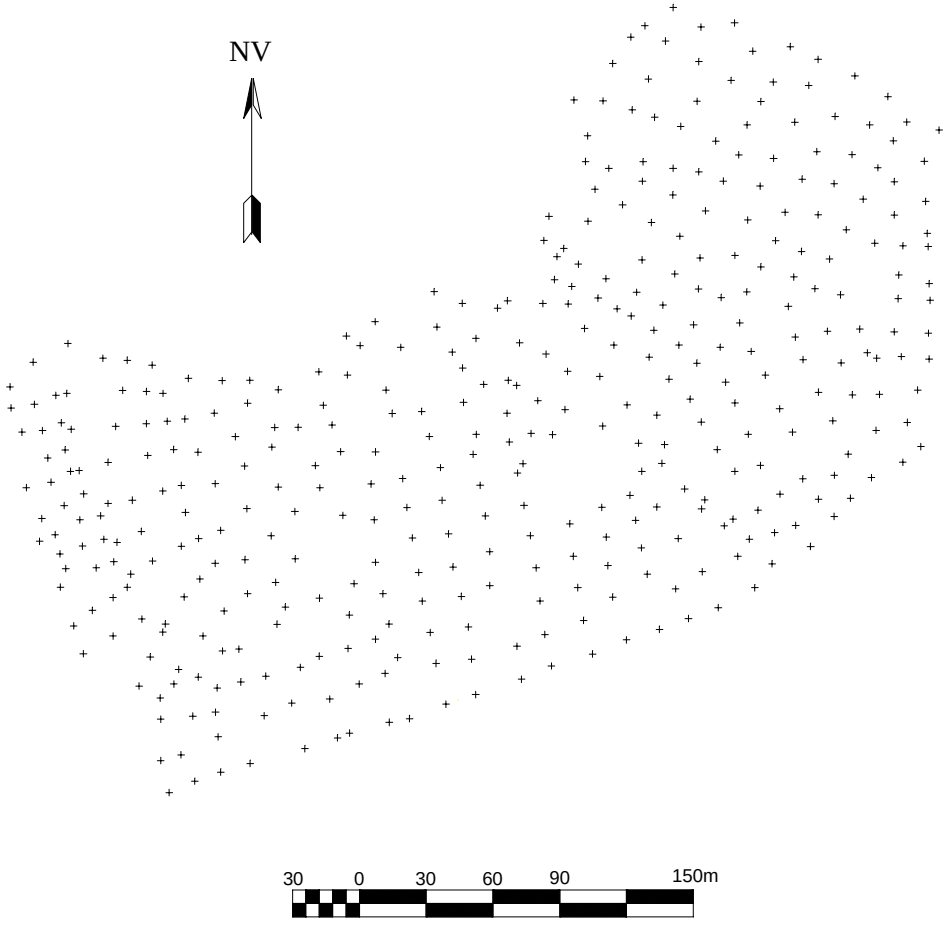


Figura 18 – Distribuição dos pontos amostrais.

Diante das características do levantamento topográfico, o erro esperado na determinação das diferenças de nível é inferior a 0,045 m; menor que a precisão requerida para os pontos de verificação, que segundo Merchant (1982) deve ser melhor que a terça parte do erro padrão do documento a ser analisado.

5.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados coletados no campo, foram processados usando o programa topoGRAPH, para a obtenção das coordenadas UTM e, posteriormente, os modelos digitais para a realização do controle de qualidade.

A geração dos Modelos Digitais do Terreno, com a aplicação do programa Topograph, foi feita através do método de triangulação, que consiste num poliedro de faces triangulares onde os vértices dos triângulos são os pontos da superfície levantada.

Inicialmente, do conjunto de 425 pontos levantados no terreno, foram escolhidos 10 pontos para serem utilizados na verificação. Após a geração dos modelos digitais, foi realizada a interpolação sobre os pontos de controle de qualidade. A qualidade do MDT foi

realizada pela análise estatística dos valores das altitudes obtidas do levantamento de campo e as dos respectivos pontos interpolados no MDT gerado.

Com as coordenadas dos pontos de verificação obtidos do levantamento de campo (Z^c) e as respectivas coordenadas interpoladas do modelo gerado (Z^i), calculou-se a média e o desvio padrão (tabela 3).

Tabela 3 – Comparação de altitudes dos pontos de verificação

Ponto	Z^c (m)	Z^i (m)	Erro (m)
1	440.016	440,044	-0,028
2	440.601	441,567	0,034
3	441.602	441,564	0,038
4	441.845	441,838	0,007
5	443.705	443,551	0,154
6	440.632	440,506	0,126
7	442.515	442,313	0,202
8	438.383	438,300	0,083
9	431.220	431,293	-0,073
10	431.227	431,345	-0,118
Média			0,043
E.M.Q.			0,101

A distribuição dos pontos de verificação está representada na figura 19.

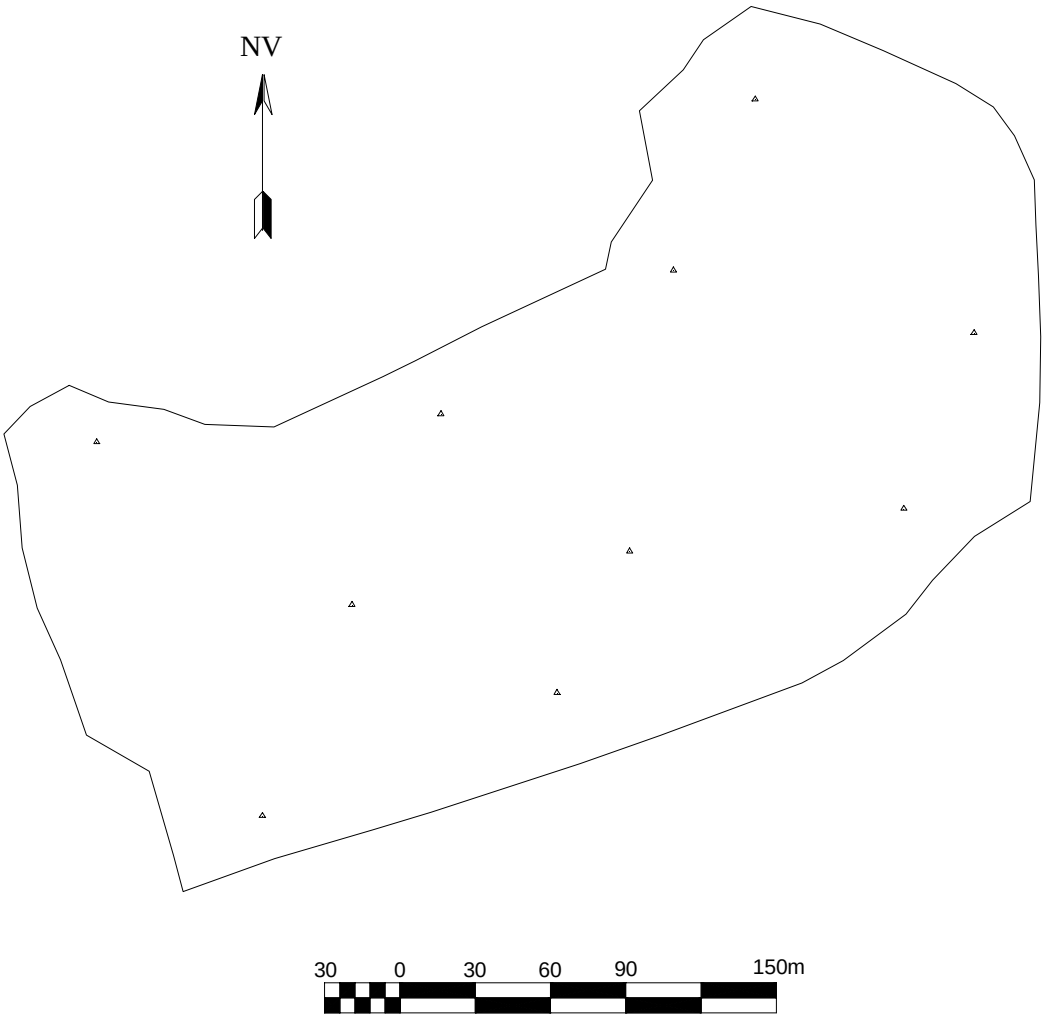


Figura 19 – distribuição dos 10 pontos de verificação.

Com a média e o desvio calculados com os 10 pontos de verificação, utilizando-se da expressão 21 calculou-se o tamanho mínimo da amostra, necessária para a avaliação do modelo digital gerado. Obteve-se assim, um tamanho mínimo de amostra de 20 pontos que estão relacionados na tabela 4.

Para o cálculo do tamanho da amostra foram utilizados os seguintes valores:

Z_r=1,96 (da tabela da distribuição normal)

SD=0,101m (Erro Médio Quadrático da amostra de 10 pontos)

S=0,045m (erro esperado na determinação dos desníveis).

Tabela 4 – Comparação das altitudes dos 20 pontos de verificação.

Pontos	Z^c (m)	Z^l (m)	Erro (m)
01	427,606	427,612	-0,006
02	431,220	431,293	-0,073
03	433,855	433,944	-0,089
04	431,227	431,345	-0,118
05	438,277	438,285	-0,008
06	438,383	438,300	0,083
07	436,202	436,344	-0,142
08	438,532	438,411	0,121
09	440,632	440,506	0,126
10	442,007	441,968	-0,039
11	442,515	442,313	0,202
12	441,543	441,467	0,076
13	443,705	443,551	0,154
14	441,845	441,838	0,007
15	443,752	443,408	-0,084
16	440,016	440,044	-0,028
17	443,190	443,241	0,051
18	443,214	443,258	0,044
19	441,602	441,564	0,038
20	440,601	440,567	0,034
Média			0,022
E.M.Q.			0,087

A distribuição dos 20 pontos de verificação pode ser vista na figura 20.

Realizando novo cálculo, com os 20 pontos de verificação, obtêm-se o tamanho da amostra de 14 pontos, constatando-se que esta é suficiente para a realização de análises.

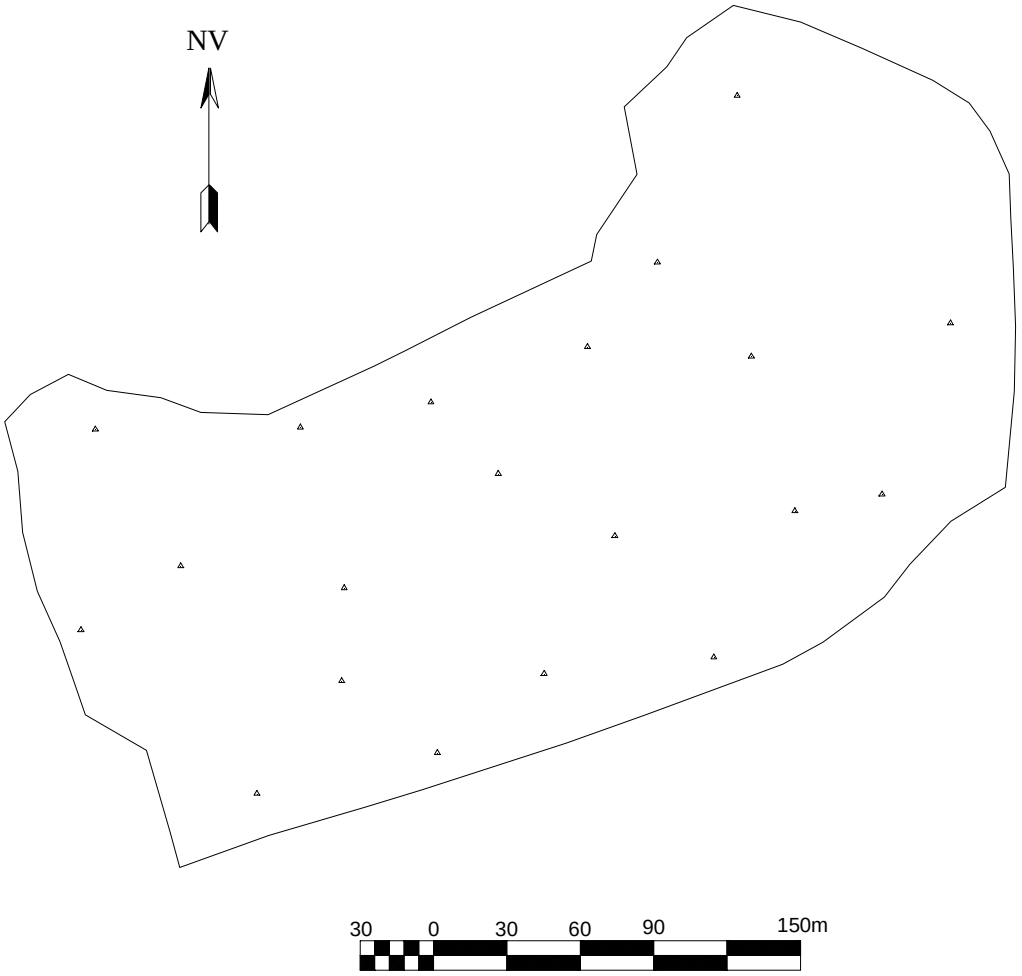


Figura 20 – Distribuição dos 20 pontos de verificação.

Selecionados os pontos de verificação, inicialmente foi gerado um MDT com 400 pontos amostrais, apresentando uma densidade média de 53 pontos amostrais por hectare, que corresponde a um espaçamento médio de 15 metros.

Os modelos digitais foram obtidos através do modo de processamento normal, onde se considera o modelo global, realizado a triangulação de Delaunay e a interpolação por B-spline. Sendo que neste modo o programa utiliza a interpolação por curvas, o que implica na busca do triângulo adequado dentro da malha.

Com a finalidade de se ter homogeneidade nos contornos, no processamento, foi usado na B-spline com nível de suavização 6, que pode variar de 1 à 10. O nível de suavização está relacionado com a ordem das funções B-spline.

Ainda no processamento, o programa utilizado apresenta a possibilidade de se delimitar a área de interesse criando uma fronteira, que contorna a região a ser interpolada.

Após estas considerações, procedeu-se à geração dos modelos digitais, que em razão da dimensão da área de estudo, foram obtidas plantas na escala

1:3000 com equidistância das curvas de nível de 1 metro.

Tabela 6 – Comparação das altitudes dos pontos de verificação.

Pontos	Erro (m) 53 ptos/ha	Erro (m) 40 ptos/ha	Erro (m) 26 ptos/ha	Erro (m) 20 ptos/ha
1	-0,006	-0,098	-0,105	-0,169
2	-0,073	-0,159	-0,149	-0,097
3	-0,089	0,185	0,157	0,162
4	-0,118	-0,127	-0,127	-0,080
5	-0,008	-0,013	0,099	0,117
6	0,083	0,139	0,137	0,165
7	-0,142	-0,034	-0,064	-0,075
8	0,121	0,120	0,022	0,035
9	0,126	0,156	0,155	0,157
10	-0,039	-0,079	-0,166	-0,046
11	0,202	0,176	0,415	0,415
12	0,076	-0,141	-0,085	-0,088
13	0,154	0,161	0,175	0,249
14	0,007	0,104	0,077	0,095
15	-0,084	0,039	-0,087	-0,012
16	-0,028	-0,190	-0,201	-0,162
17	0,051	0,077	0,088	0,140
18	0,044	-0,010	0,134	0,118
19	0,038	-0,010	-0,012	-0,037
20	0,034	-0,014	-0,006	-0,007
Média	0,022	0,014	0,023	0,044
E.M.Q.	0,087	0,121	0,152	0,148

Do modelo inicialmente gerado com densidade de 53 pontos amostrais por hectare (anexos 1 e 2),

foram retirados 100 pontos, obtendo-se assim, um novo modelo com 40 pontos por hectare, com espaçamento médio de 17 metros (anexos 3 e 4).

A cada modelo gerado realizou-se a análise estatística, verificando-se a precisão, a análise de tendência e a exatidão, sempre tomando como parâmetro o padrão de exatidão cartográfica.

Novos modelos foram gerados, com sucessivas retiradas de pontos amostrais (modelo com densidade de 26 pontos por hectare, anexos 5 e 6), até se obter a densidade mínima com resultados dentro da especificação segundo o padrão de exatidão (anexo 7 e 8).

Em razão da diferença de declividade verificada na área de estudo, foram realizados novos estudos, procurando-se em regiões com maior declividade estabelecer concentração maior de pontos que naquelas com menor declividade.

Processando-se os dados, fazendo esta consideração, ou seja, retirando pontos da região com declividade de aproximadamente 3%, foram obtidos os resultados que estão apresentados na tabela 7.

Na figura 21 pode-se visualizar a região com declividade de aproximadamente 3%, dentro da área de estudo.

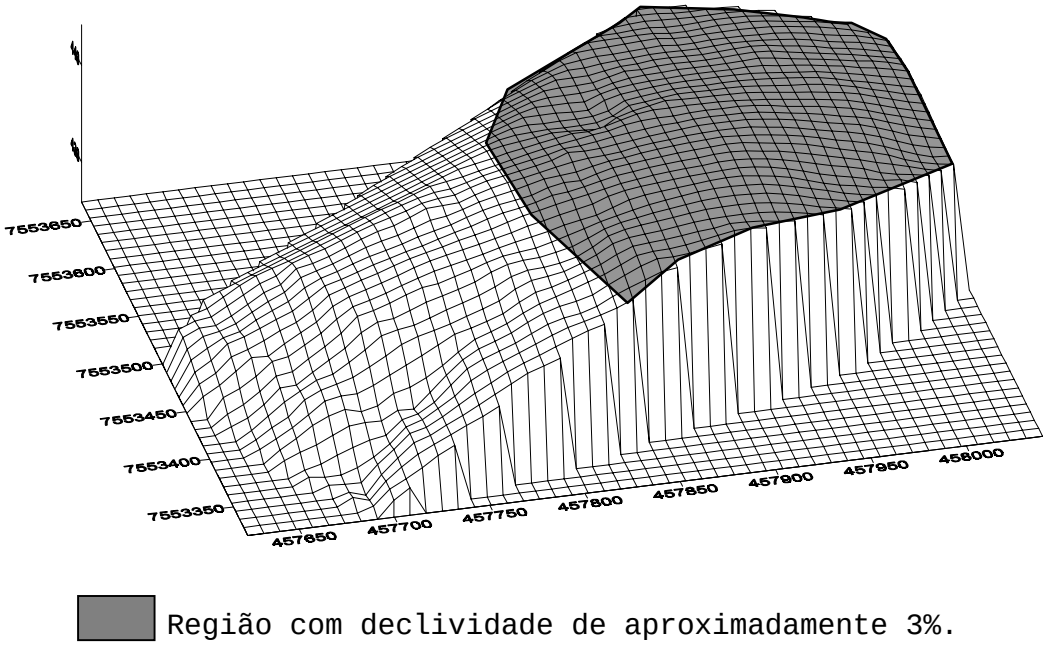


Figura 21 – Região com declividade de aproximadamente 3%.

Os modelos gerados encontram-se nos anexos 9 e 10 com 16 pontos por hectare; nos anexos 11 e 12 os obtidos com 12 pontos por hectare e por fim nos anexos 13 e 14 os modelos obtidos com 11 pontos por hectare.

Tabela 7 – Comparação das cotas dos pontos de verificação na região com declividade de 3%.

Pontos	Erro (m) 17 ptos/ha	Erro (m) 15 ptos/ha	Erro (m) 12 ptos/ha	Erro (m) 11 ptos/ha
9	-0,088	-0,089	-0,044	-0,046
10	0,049	-0,072	-0,101	-0,101
12	0,043	-0,042	-0,077	-0,077
13	-0,231	-0,269	-0,278	-0,276
14	-0,127	-0,130	-0,066	-0,271
15	0,186	0,186	0,175	0,174
16	0,159	0,161	0,200	0,196
17	-0,157	-0,159	-0,159	-0,162
18	-0,111	-0,107	-0,144	-0,144
19	0,037	0,049	0,047	0,048
20	-0,119	-0,108	-0,117	-0,147
Média	-0,033	-0,053	-0,051	-0,073
E.M.Q.	0,135	0,136	0,143	0,158

Foram processados também, considerando apenas os dados da região com declividade de 12%, obtendo-se os dados apresentados na tabela 8.

Tabela 8– Comparação das altitudes dos pontos na região com declividade de 12%.

Pontos	Erro (m) 20 ptos/ha (região com 12%)	Erro (m) 20 ptos/ha (área toda)
1	-0,170	-0,169
2	-0,095	-0,097
3	0,158	0,162
4	-0,078	-0,080
5	0,119	0,117
6	0,167	0,165
7	-0,066	-0,075
8	0,017	0,035
Média	0,007	0,128
E.M.Q.	0,007	0,130

6. RESULTADOS OBTIDOS

A qualidade, dos resultados obtidos, foi avaliada através da análise estatística das discrepâncias entre as cotas dos pontos orinduas do levantamento de campo e as homólogas interpoladas do MDT gerado.

Na avaliação da exatidão, segundo o critério adotado por Leal e Dalmolim (1998), calculou-se a média populacional estimada μ a partir da média amostral $\bar{x}$, tomando-se o intervalo de confiança de 90% e 19 graus de liberdade através da equação 8:

$$\mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha})\left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right)$$

Dados:

Média amostral $\bar{x}$=0,022m

Desvio padrão amostral S=0,087m

Conforme a tabela t_{α}=1,328

Tamanho da amostra n=20

$\mu \leq$ 0,048m

ou seja, a média estimada da população é inferior a 0,048m no intervalo de confiança de 90%.

Em seguida, fez-se a avaliação da exatidão do modelo gerado através da distribuição t de Student, com a equação 9

$$t = \frac{\left(\bar{x} - \mu_0\right)}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

onde μ_0 é a média populacional esperada, que para a classe A no presente trabalho é igual 0,333m, que é o erro padrão estabelecido pelo Padrão de Exatidão Cartográfica, e formula-se a seguinte hipótese:

H_0: $\mu \leq 0{,}333m$

H_1: $\mu > 0{,}333m$

e obtém-se t=-15,987.

Como t=-15,987 < 1,328, aceita-se a hipótese H_0 ao nível de significância de 10%, e pode ser classificado como de classe A em acurácia.

Para avaliar a precisão, o desenvolvimento é semelhante ao da determinação da exatidão, diferenciando-se no tipo de teste aplicado, utilizando-

se neste caso o desvio padrão, que é calculado através da equação 10.

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)\cdot s^2}{\chi^2_{1-\alpha}}}$$

onde:

Média amostral $\bar{x}$=0,022m

Desvio padrão amostral S=0,087m

Tamanho da amostra n=20

Intervalo de Confiança de 90%

obtém-se σ=0,111m.

Após o cálculo da estimativa do desvio padrão da população, aplica-se um teste de hipótese através da distribuição Qui-quadrado, com a equação 11

$$\chi^2 = \frac{(n-1)\cdot s^2}{\sigma_0^2}$$

onde σ_0^2 é a variância populacional esperada (σ_0=0,333) e o argumento é o grau de liberdade associado à probabilidade de 90% para a validação da precisão.

Formula-se o teste

H_0: $\sigma \leq 0{,}333^2$, contra

H_1: $\sigma > 0{,}333^2$

Como $\chi^2_{1-\alpha} = 6{,}056 < \chi^2_{\alpha} = 27{,}204$, aceita-se a hipótese H_0 ao nível de significância de 10%.

Na tabela 8 têm-se os resultados da avaliação realizada para a exatidão dos modelos gerados.

Da tabela 8, constata-se que todos dos modelos gerados apresentam suficiente exatidão e precisão para serem classificados como de classe A.

Tabela 8 – Análise da exatidão e precisão dos modelos.

	53 ptos/ha	40 ptos/ha	26 ptos/ha	20 ptos/ha
$\bar{x}$	0,022 m	0,014 m	0,023 m	0,044 m
S	0,087 m	0,121 m	0,152 m	0,148 m
t_α (tabela)	1,328	1,328	1,328	1,328
$\chi^2_{1-\alpha}$ (tabela)	11,651	11,651	11,651	11,651
χ^2_{α} (tabela)	27,204	27,204	27,204	27,204
μ	0,048 m	0,050 m	0,068 m	0,088 m
μ_0 (A)	0,333 m	0,333 m	0,333 m	0,333 m
μ_0 (B)	0,4 m	0,4 m	0,4 m	0,4 m
μ_0 (C)	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m
σ	0,111 m	0,155 m	0,194 m	0,189 m
t (A)	-15,987	-11,790	-9,121	-8,733
χ^2	6,056	7,701	5,308	4,952

Outro critério de avaliação de documento cartográfico é através do modelo apresentado por Galo e Camargo (1994), onde se faz a análise de tendências e de precisão.

Para o teste de tendências avalia-se as hipóteses:

$H_0 : \overline{\Delta X} = 0$, contra
$H_1 : \overline{\Delta X} \neq 0$

Neste critério de avaliação, se verifica se há tendência calculando-se a estatística amostral t através da expressão 16,

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n}$$

onde:

tamanho da amostra $\overline{\Delta X} = 0{,}022m$

desvio padrão da amostra $S_{\Delta X} = 0{,}087m$

tamanho da amostra $n = 20$

obtendo-se t_x=1,131, e verifica-se se o valor encontrado está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula.

A precisão é analisada formulando-se a seguinte hipótese:

$H_0 : S_x^2 = \sigma_x^2$, contra

$H_1 : S_x^2 \neq \sigma_x^2$

onde:

desvio padrão esperado para a classe A $\sigma_x{}^2=0,333^2$

desvio padrão da amostra $S^2{}_{\Delta x}=0,087m$, e

tamanho da amostra n=20.

Realiza-se a estatística com a expressão 17:

$$\chi_x^2 = (n-1)\frac{S_{\Delta x}^2}{\sigma_x^2}$$

obtendo-se para a documentos de classe A $\chi_x^2 = 1,297$.

Na tabela 9 encontram-se os resultados dos testes realizados utilizando-se do modelo apresentado por Galo e Camargo (1994), na análise de tendências e de precisão.

Tabela 9 – Análise de tendências e de precisão.

	53 ptos/ha	40 ptos/ha	26 ptos/ha	20 ptos/ha
$\bar{x}$	0,022 m	0,014 m	0,023 m	0,044 m
S	0,087 m	0,121 m	0,152 m	0,148 m
t	1,131	0,517	0,677	1,330
t_{α}	1,328	1,328	1,328	1,328
χ^2_{α}	15,987	15,987	15,987	15,987
χ^2_{A}	1,297	2,509	3,959	3,753

Através desta análise, verifica-se que apenas o modelo gerado com 20 pontos/hectare apresenta rejeição quando da análise de tendência.

Os demais modelos podem ser classificados como de classe A, onde se pode ter erro padrão de até 1/3 da equidistância. Nestas condições, considera-se como erro padrão o valor de 0,333 metros.

Foi realizado também um teste, adotando uma concentração maior de pontos na região da linha de quebra (mudança de declividade), mas não foi constatada melhora significativa nos modelo, apresentados nos anexos 15 e 16.

Novos testes foram realizados, considerando apenas a região com declividade de aproximadamente 3%. Os resultados da análise de tendências e de precisão são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Análise de tendência e precisão da região com declividade de 3%.

	17 ptos/ha	15 ptos/ha	12 ptos/ha	11 ptos/ha
$\bar{x}$	-0,033 m	-0,053 m	-0,051 m	-0,073 m
S	0,135 m	0,136 m	0,143 m	0,158 m
t_α	1,350	1,350	1,350	1,350
t	0,811	1,293	1,183	1,532
χ^2_α	19,812	19,812	19,812	19,812
χ^2_A	1,342	1,668	1,844	2,251

Analisando a tabela 10 constata-se que quando se trabalha com áreas com declividade de aproximadamente 3%, obtém-se resultados satisfatórios, para a classificação como sendo de classe A, com apenas 12 pontos amostrais por hectare.

O teste realizado, considerando apenas a região com declividade de 12% , não apresentou resultados melhores que aquele realizado com a área toda, como pode ser constatado na tabela 8.

7. CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados, com os modelos digitais do terreno, sobre controle de qualidade, apesar de se ter utilizado apenas do programa topoGRAPH, pode-se constatar que:

- a distribuição dos pontos amostrais é tão importante quanto a densidade;

- a densidade de pontos tem estreita relação com a declividade, sendo que em região com declividade de aproximadamente 3%, pode-se obter resultados satisfatórios, ou seja, modelos digitais que podem ser classificados como de classe A em termos de altimetria, com densidade de 12 pontos por hectare, que corresponde a um espaçamento de 28 m entre pontos;

- independentemente do programa a ser utilizado, nas linhas de mudança de declividade, há necessidade de que sejam coletados pontos amostrais; e

- a localização dos pontos de verificação é de grande importância, bem como o tamanho da amostra.

É interessante observar, que nesta pesquisa, quando a área de estudo é considerada como um todo, é necessário uma densidade de 21 pontos por

hectare, que corresponde a um espaçamento médio de 22 metros entre pontos amostrais.

A variação na densidade de pontos de acordo com a declividade está relacionada com as características fisiográficas das regiões da área de estudo. Podendo-se constatar que há necessidade de uma concentração menor em região onde a declividade é menor, onde se verifica que o terreno se apresenta mais suave, apenas com ondulações.

O tamanho mínimo da amostra necessária depende do grau de acurácia requerido, portanto, o dimensionamento do tamanho da amostra é fundamental para que a obtenção da confiabilidade na realização do controle de qualidade.

Através dos resultados das análises realizadas, constata-se que é imprescindível a realização de análises estatísticas dos modelos digitais do terreno, pois essas bases geradas poderão ser os documentos fiéis para a realização de planejamentos e posterior execução dos projetos de engenharia.

Verifica-se que mesmo que os resultados apresentem valores aparentemente dentro dos limites de

padrões aceitáveis, os testes estatísticos apontam que estes poderão não ser confiáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, F. Experimental Investigation into the Accuracy of Contourning from DTM. P*hotogrammetric Engeneering and Remote Sensing*, vol.44, No. 12, December 1978. p.1537-1548.

ALBERTI,M.; MACEDO,F.C.; NADAL,C.A. Testes de interpolação para obtenção de curvas de nível utilizando o software surfer. In: *XVII Congresso Brasileiro de Cartografia,* Salvador, Bahia, 1995. p.1306-1314.

BARBOSA, R.L. *Geração de Modelo Digital do Terreno por Aproximações sucessivas utilizando câmaras digitais de pequeno formato.* 1999. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo.

BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a LASER: comparação com métodos Fotogramétricos. In: *XX Congresso Brasileiro de Cartografia*, Porto Alegre. CD-ROM.

BRASIL. Decreto n^{0} 89.817 de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras e normas técnicas da cartografia nacional. *Diário Oficial, Brasília*, 1984.

BROW, D. G.; BARA, T. J. Recognition and Reduction of Systematic Error in Elevation and Derivative Surfaces from 7🗁-minute DEMs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol.60, No.2, February 1994. p.189-194.

CAMARGO, E. C. G. Desenvolvimento, Implementação e Teste de Procedimentos Geoestatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING). 1997. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CARTER,J.R. Digital representations of topographic surfaces. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, vol.54, nº 11, November 1988. p.1577-1580.

CINTRA, J.P. *Contribuição ao Estudo de Representação de Superfícies com o Auxílio do Computador.* 1985. Tese(Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

COSTA NETO, P. L. O. *Estatística.* 1.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1977. 264p.

DOYLE, F. Digital Terrain Models: Na Overview. *Photogrammetic Engineering and Remote Sensing*, vol.44, No.12. December 1978. p.1481-1485.

FISHER, P. F. First Experiments in Viewshed Uncertainty: The Accuracy of the Viewshed Area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol.57, No.10, october 1991. p.1321-1327.

FLORINSKY, I. V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevations models. *International Journal of Geographical Information Science*, vol.12, No.1. January-February 1998. p.47-61

GALO, M. G.; CAMARGO, P. O. Utilização de GPS no Controle de Qualidade de cartas. In: I COBRAC, 2, 1994, Florianópolis. *Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário.* Florianópolis. 1994. p.41-48.

GEMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.* Curitiba, Editora da UFPR, 1994. 319p.

GUTIÉRREZ, E. Análise de modelos tridimensionais de terreno. In: *XV Congresso Brasileiro de Cartografia*, São Paulo.1991.

JANCAITIS,J.R.; JUNKINS,J.L. Modeling Irregular Surfaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1973. p.413-420.

LEAL, E. M.; DALMOLIN, Q. Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD. In: *GIS Brasil 99; V Congresso e Feira para usuários em Geoprocessamento da América Latina.* Salvador, BA. Maio 1999. CD-ROM.

LI, Z. Effects of Check Points on de Reliability of DTM Accuray Estimates Obtained fron Experimental Tests. *Photogrammetric Engineering*, vol.57, n 10. October 1991. p.1333-1340.

MARQUES, J. M. Notas de Aula da Disciplina Ajustamento I, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas. UFPR, Curitiba, PR. 1987. 90p.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. *Tecnical Papers of the Americam Compress on Surveying and Mapping.* Vol.1, 1982. p.222-231.

MILLER,C.L.; LAFLAMME,R.A. The Digital Terrain Model – Theory & Application. *Photogrammetric Engineering.* 1958. p.433-442.

MITISHITA,E.A. *Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para fins de Mapeamento na Área Florestal.* 1997. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS:* descrição, fundamentos e aplicações. 1.ed. São Paulo: Editora da Unesp, 2000.

MONICO, J. F. G., CHAVES, J. C., ISHIKAWA, M. I. Nivelamento de Precisão usando o GPS e Interpolação Geométrica do Geóide. In: *VII Congresso Nacional de Engenharia de Agrimensura*. Salvador, Bahia. 1996.

PETTINATI,F. Digital Terrain Modeling – A Brazilian Approach. In: *Computer Aplications in Production and Engineering, Holanda*. 1983. p.531-544.

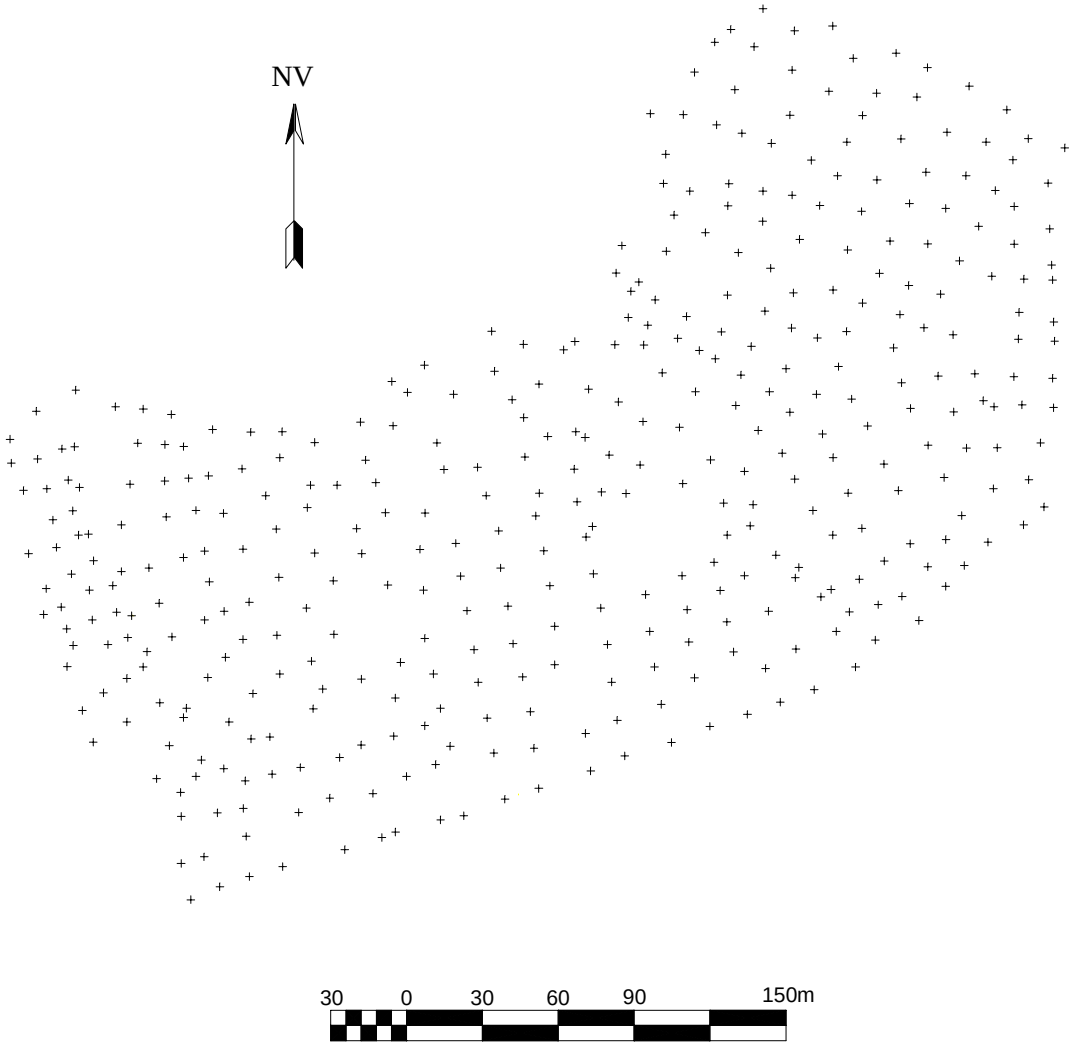
PIEGL, L.; TILLER, W. *The NURBS Book.* 2.ed. Germany: Springer. 1997.646p.

PINTO, J. R. M. *Potencialidades do uso do GPS em obras de Engenharia*. 2000.Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp, Presidente Prudente.

SANTOS, C. J. B. *Avaliação da qualidade de modelos digitais do terreno construídos a partir de diferentes fontes de aquisição de dados*. Dissertação (Mestrado em Estudos Populacionais e Pesquisas Sociais: Produção e Análise de Informações Geográficas). 2001. Escola Nacional de Ciências Estatísticas, Rio de Janeiro.

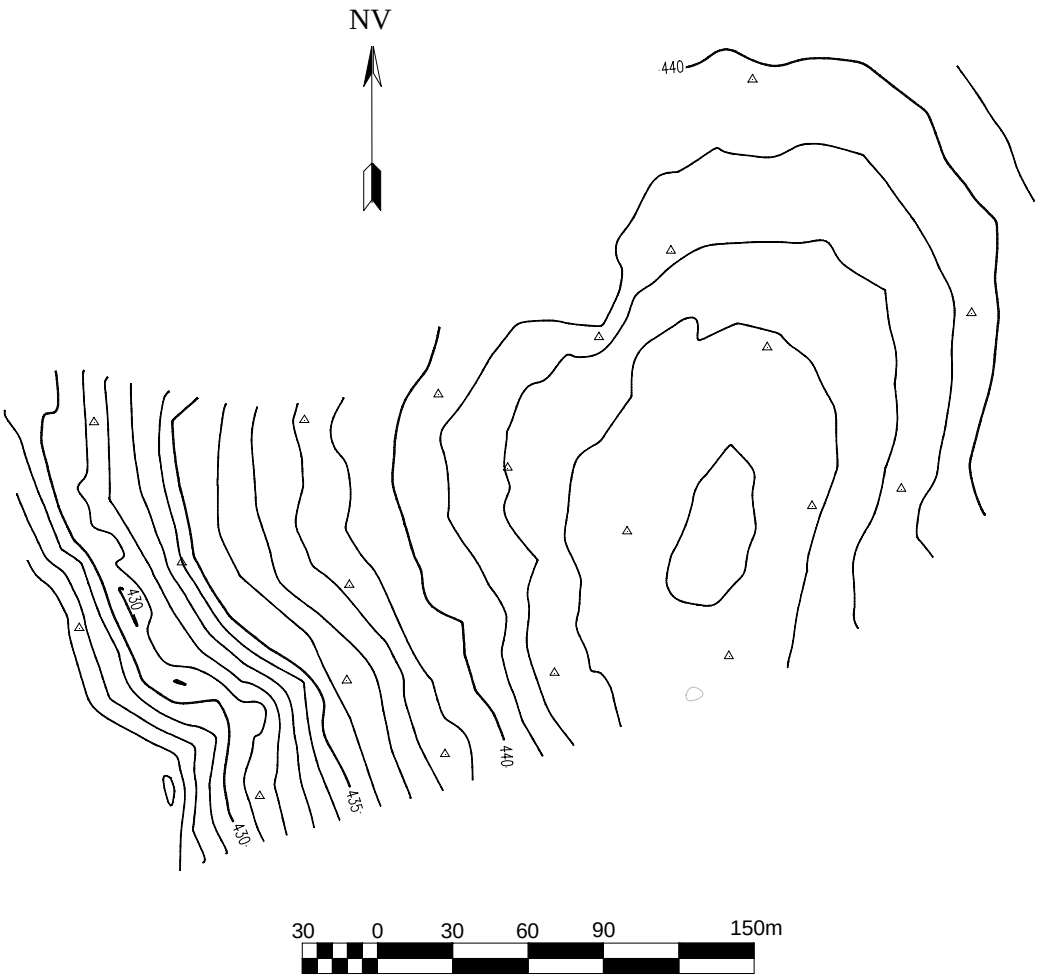
SCHMIDLEY, R. W. Quality Control in Mapping: Some Fundamental Concepts. *Surveying and Land Information Systems*, vol.57 No.1. 1997. p.31-36

Anexo 1



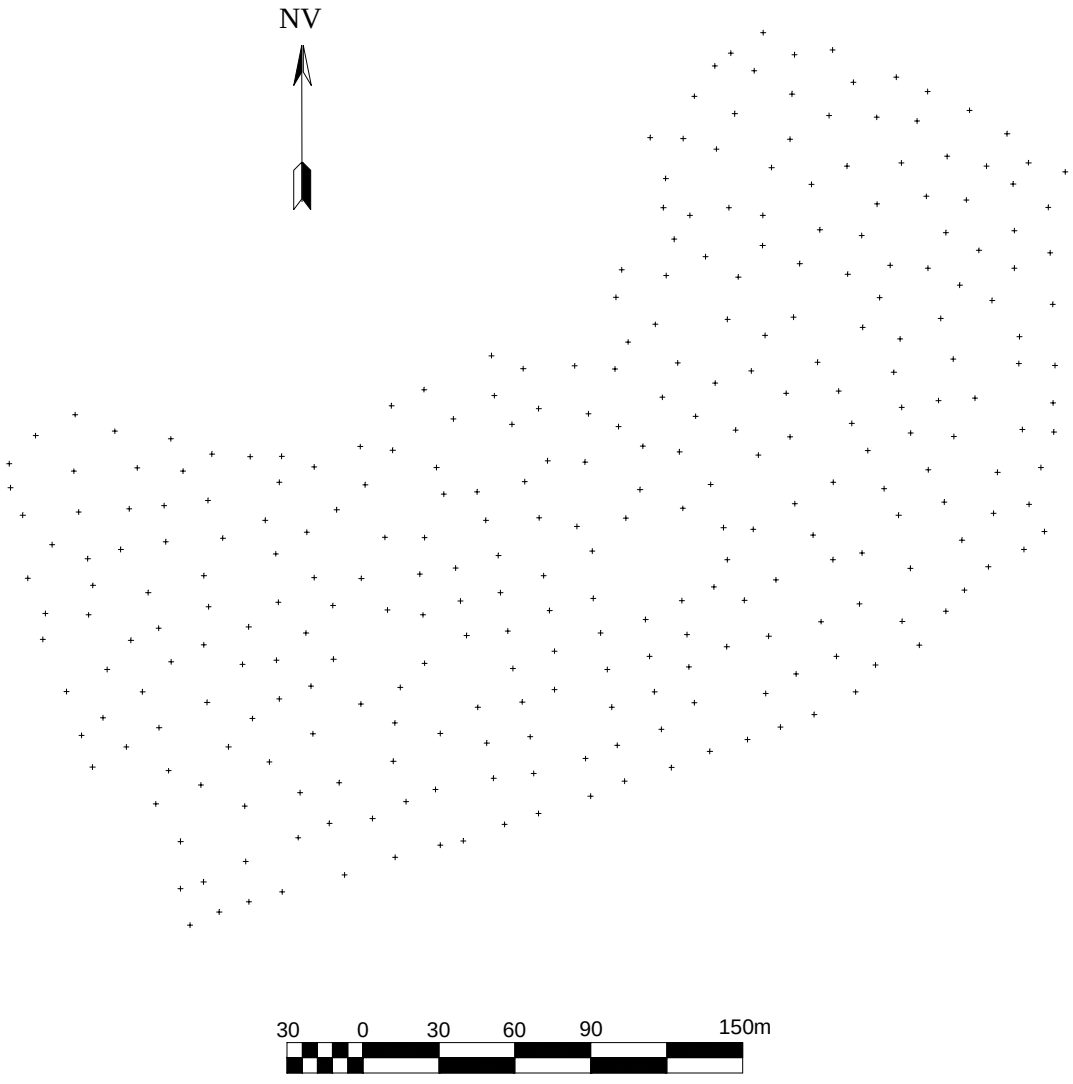
Distribuição dos pontos amostrais: 53/hectare.

Anexo 2



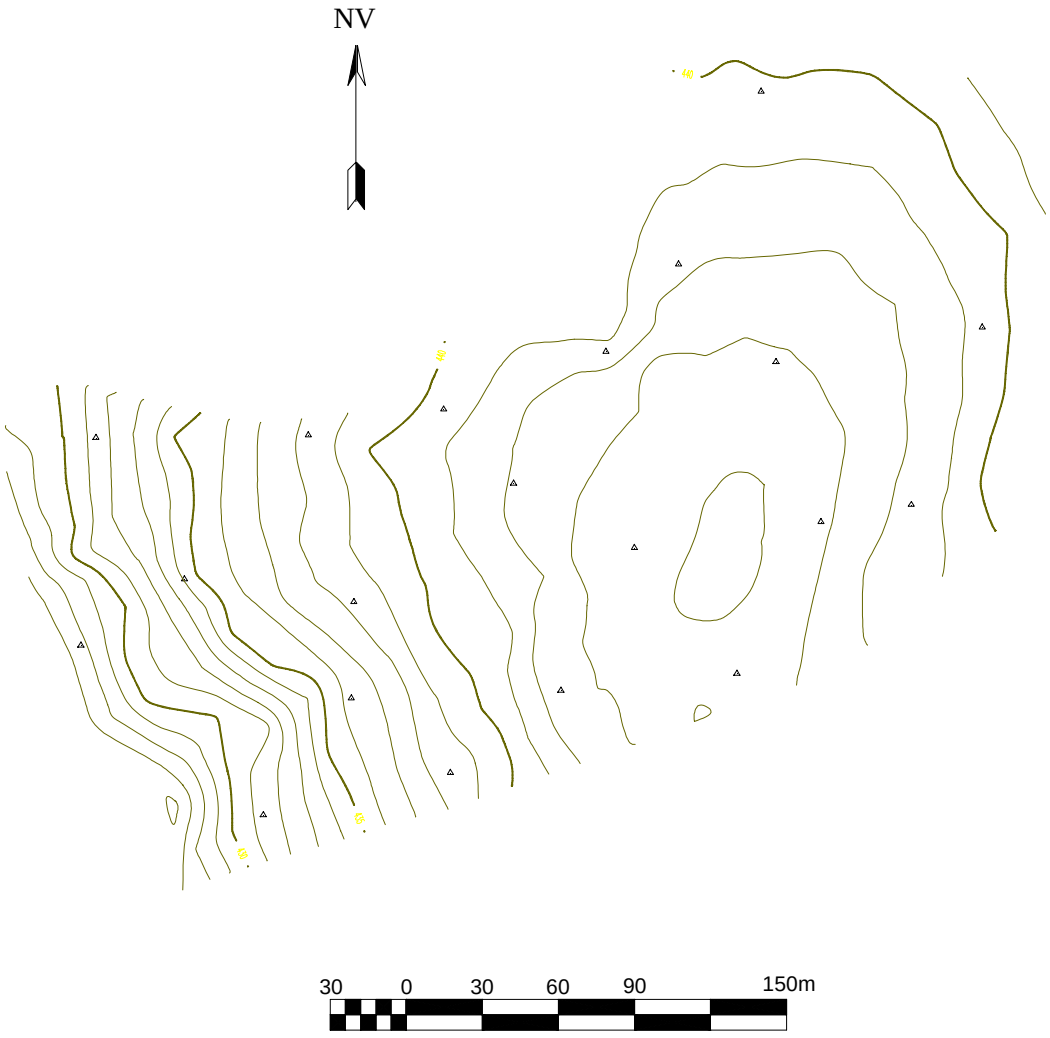
Modelo gerado com 53 pontos por hectare.

Anexo 3



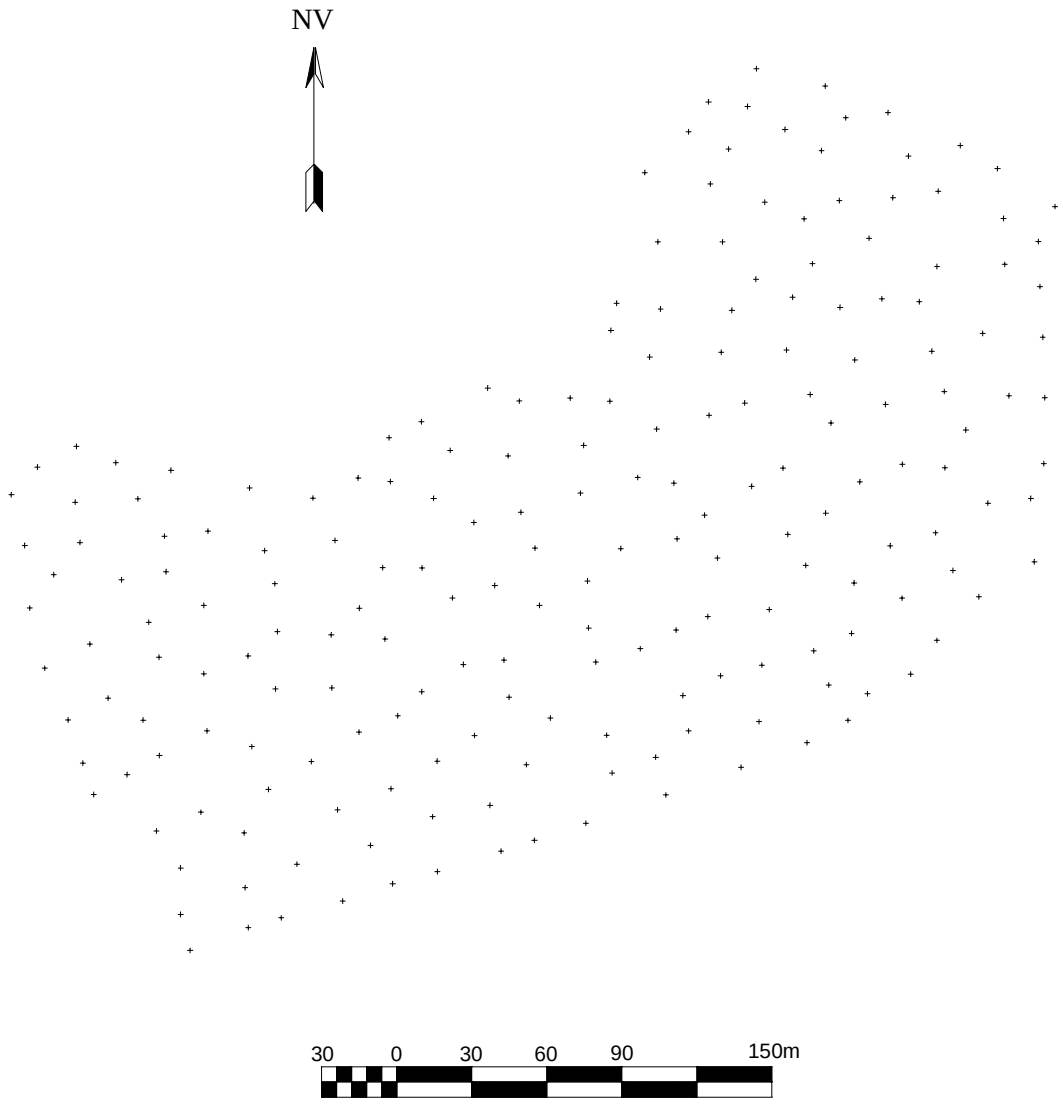
Distribuição dos pontos amostrais: 40/hectare.

Anexo 4



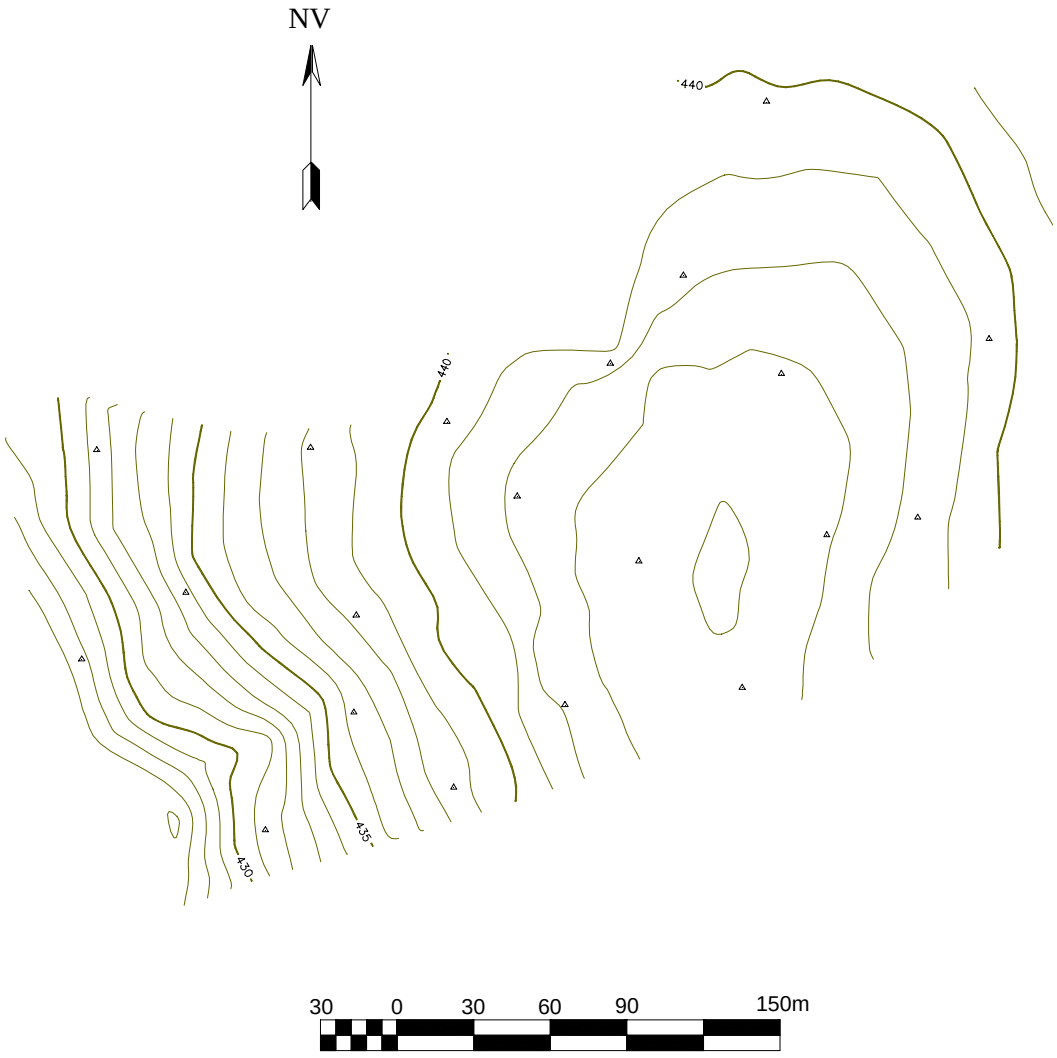
Modelo gerado com 40 pontos por hectare.

Anexo 5



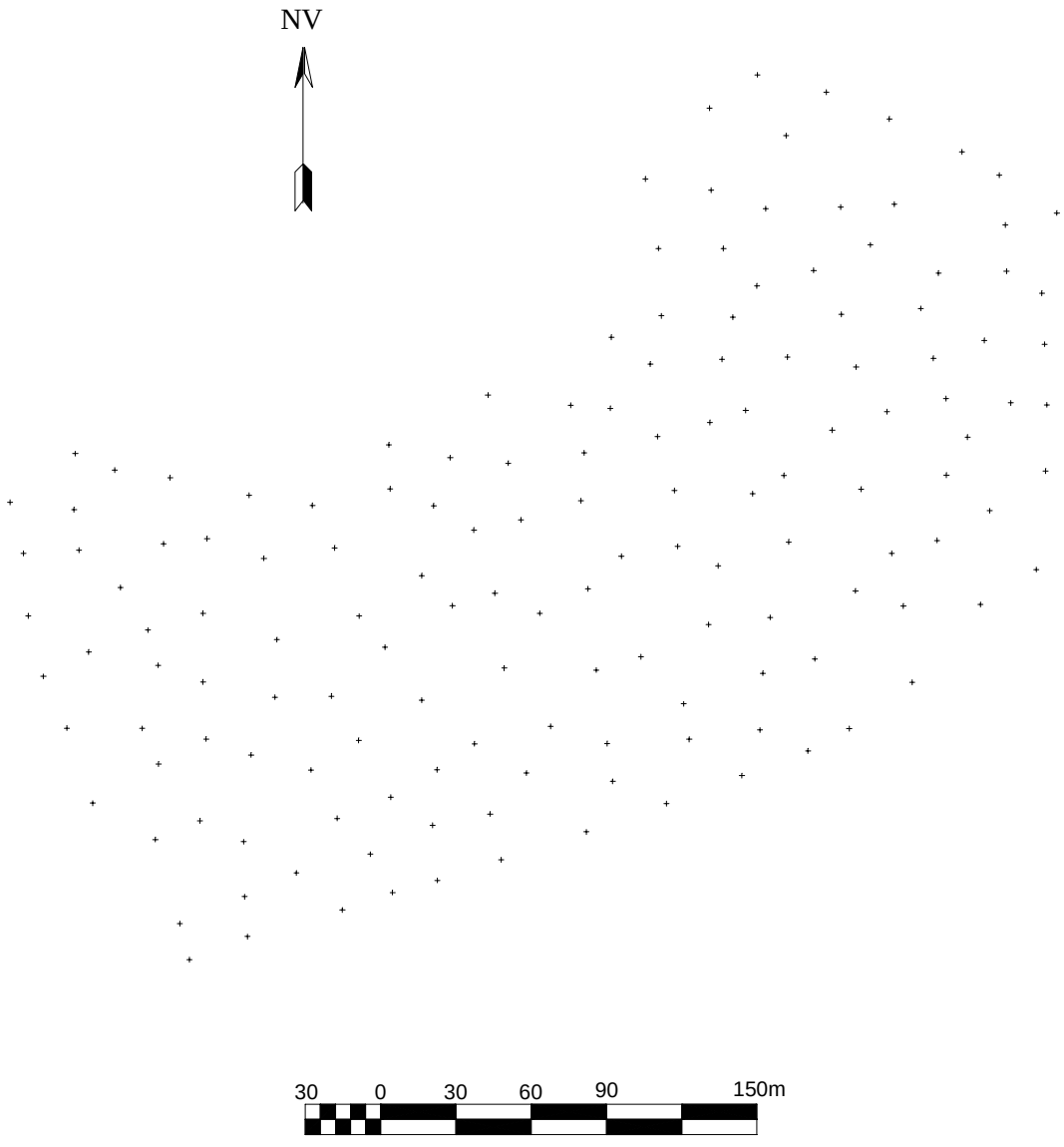
Distribuição dos pontos amostrais: 26/hectare

Anexo 6



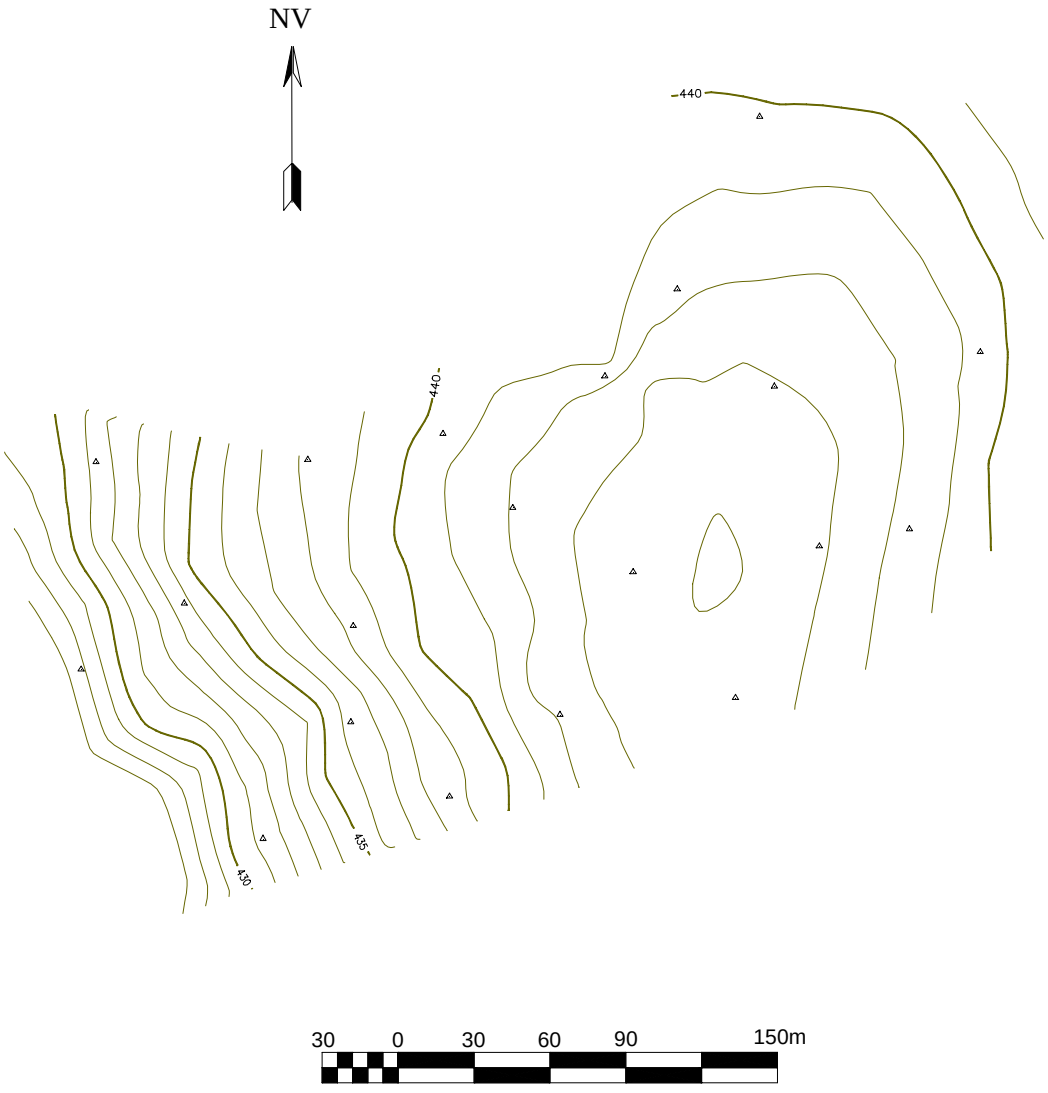
Modelo gerado com 26 pontos por hectare.

Anexo 7



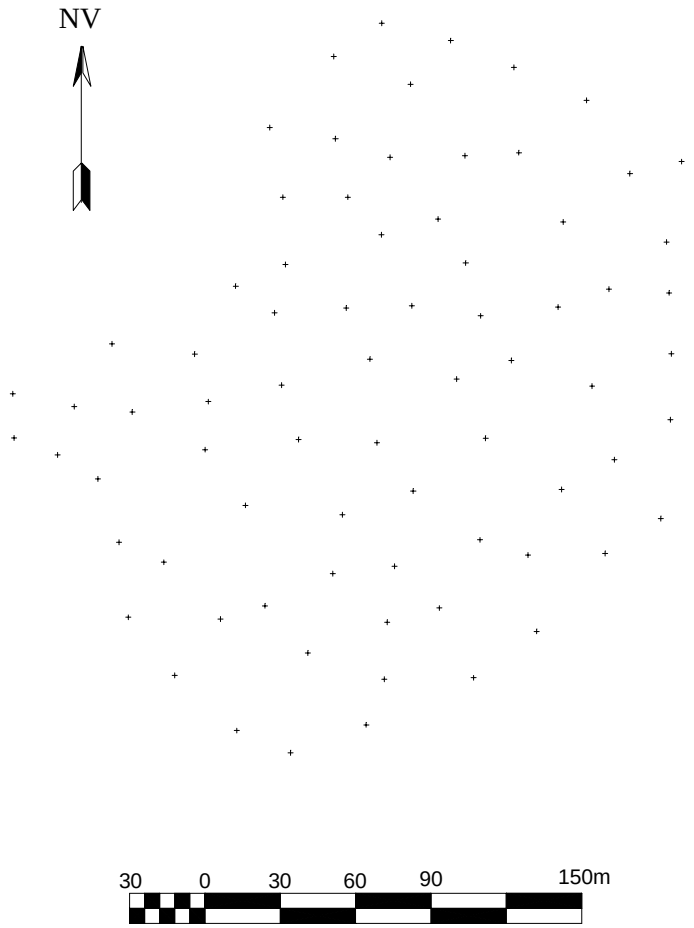
Distribuição dos pontos amostrais: 20/hectare.

Anexo 8



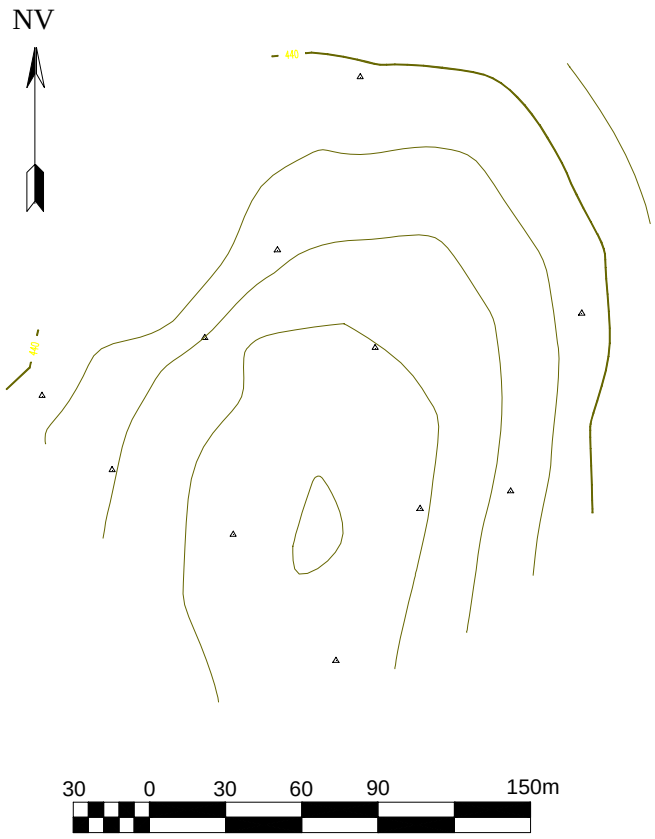
Modelo gerado com 20 pontos/hectare.

Anexo 9



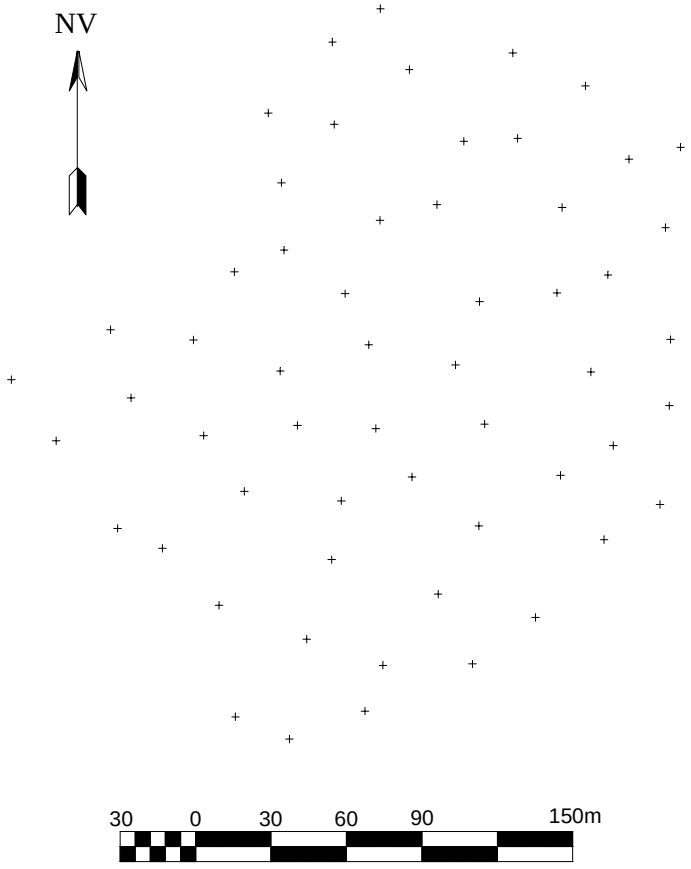
Distribuição dos pontos amostrais: 16/hectare.

Anexo 10



Modelo gerado com 16 pontos por hectare.

Anexo 11



Distribuição dos pontos amostrais: 12/hectare.

Anexo 12



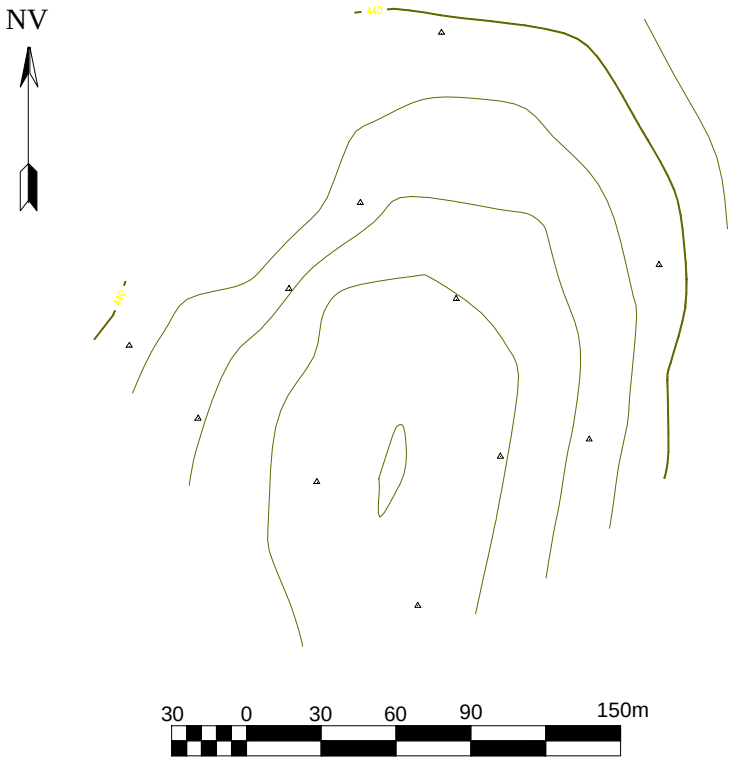
Modelo gerado com 12 pontos por hectare.

Anexo 13



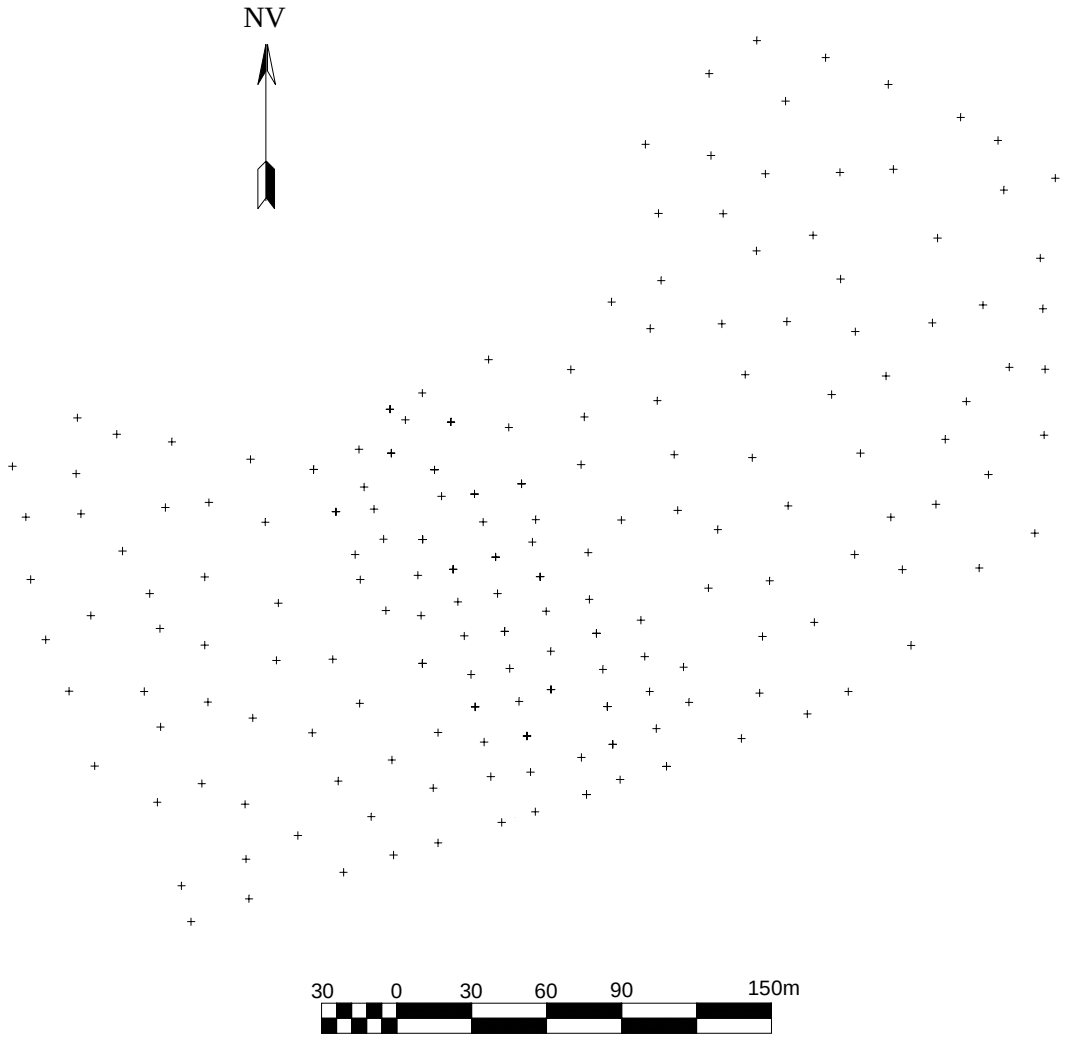
Distribuição dos pontos amostrais: 11/hectare.

Anexo 14



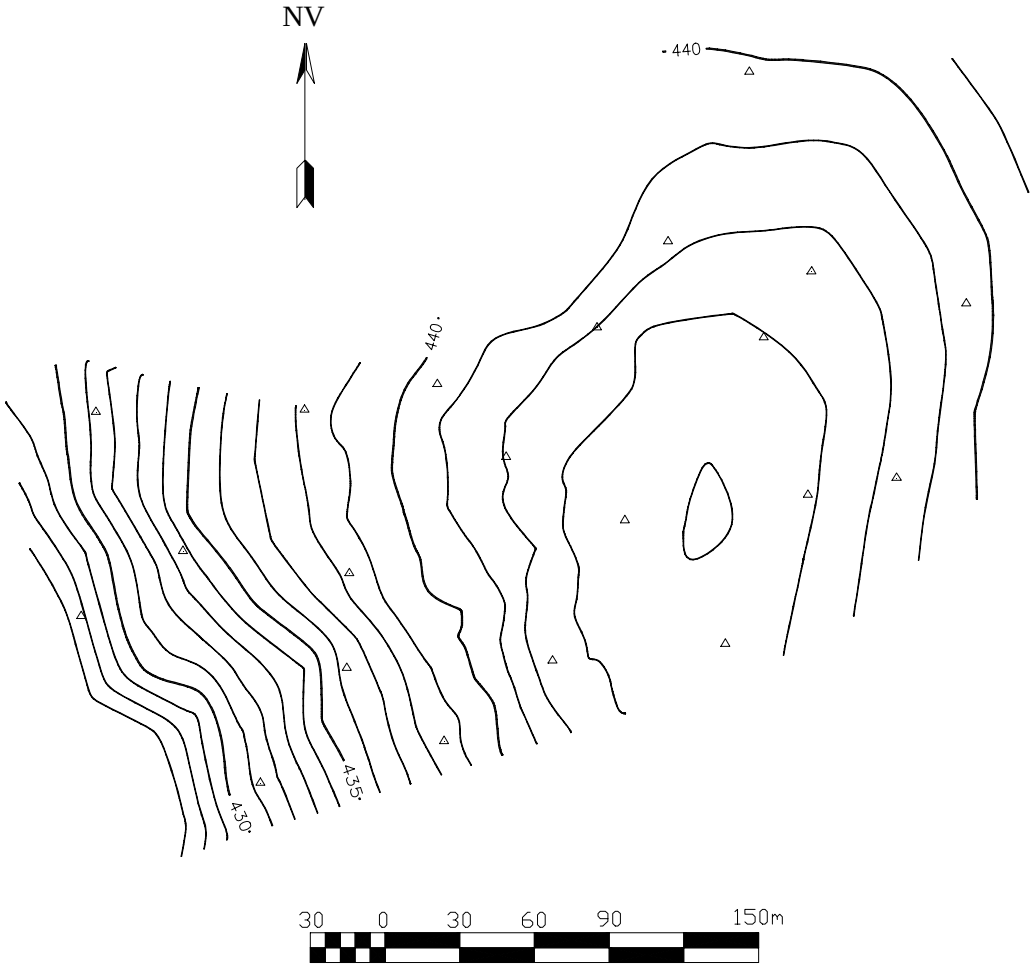
Modelo gerado com 11 pontos por hectare.

Anexo 15



Distribuição com concentração maior dos pontos na região da linha de quebra (mudança de declividade)

Anexo 16



Modelo gerado com maior concentração de pontos na região da linha de quebra (mudança de declividade)