



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

# **MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS, NO DISTRITO FEDERAL**

**TESE DE DOUTORADO**

**Nº 001**

**Marina Rolim Bilich Neumann**

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig  
Orientador

Profa. Dra. Marilusa Pinto Coelho Lacerda  
Co-Orientadora

**Brasília  
2012**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

## **MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS, NO DISTRITO FEDERAL**

MARINA ROLIM BILICH NEUMANN

PLANO DE TESE SUBMETIDA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS PRÉ-REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM GEOCIÊNCIAS  
APLICADAS

APROVADA POR:

---

HENRIQUE LLACER ROIG, Doutor, Professor Adjunto II  
(Instituto de Geociências ó Universidade de Brasília)  
(ORIENTADOR)

---

JANSLE VIEIRA ROCHA, PhD.  
(Universidade Estadual de Campinas)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

---

RUBENS AUGUSTO CAMARGO LAMPARELLI, Doutor, Pesquisador  
(Universidade Estadual de Campinas)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

---

EIYTI KATO, Doutor, Professor Adjunto I  
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária ó Universidade de Brasília)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

LUCIANO SOARES DA CUNHA, Doutor, Professor Adjunto I  
(Instituto de Geociências ó Universidade de Brasília)  
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF, 10 de fevereiro de 2012.

õAssim na Terra como no céu...ö

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus três ãanjosö e a Deus que me deram uma segunda chance para continuar vivendo e aprendendo nessa vida terrena.

Agradeço também ao meu querido orientador Henrique Llacer Roig que sempre respeitou minhas idéias e colocações e hoje posso dizer com orgulho, que é meu amigo.

Ao companheiro de todos os momentos, meu marido Alexandre, que nesses últimos sete anos, sempre esteve incondicionalmente ao meu lado, na alegria e na tristeza, saúde e na doença... Serei eternamente grata.

Aos meus pais pelo eterno apoio e meus irmãos, Kity e Bibi, pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos companheiros do IG, Gervásio e Paulo Henrique, pelo auxílio em todas as etapas do trabalho. E a Stella, querida pessoa que muito auxiliou nos trâmites para a realização da defesa.

Agradeço também aos Professores José Eloi Campos e Sebastião de Oliveira, pelas valiosas contribuições no desenvolvimento do segundo artigo.

Ao meu amigo André Farias, pelas longas conversas, as quais muito me inspiram.

Aos meus queridos amigos do laboratório Fabiana, Wendel, Ana Paula, Carol, Rosana, Taís, Patrícia, Renan, Luiz Felipe, Francielle e Fernando pelo companheirismo e momentos de belas risadas!

À amiga Patrícia Campos, companheira de todos os sábados, em nosso trabalho no Lar Jesus Menino.

Aos meus queridos companheiros da Área de Solos da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária pelo acolhimento e amizade. Um especial agradecimento aos amigos Tairone, Thais e Eiyti, que me ajudaram quando mais precisei.

Aos meus amigos de õlongas datasö, Karina, Suellen, Tati, Yuri e Felipe pelos momentos de descontração e alegria.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente possibilitaram e apoiaram a realização desse trabalho.

## RESUMO

No Brasil, nos últimos anos, o processo de planejamento territorial, seja urbano ou rural, a busca pela preservação dos recursos e seus serviços ambientais tem ganhado força. No entanto, para um adequado planejamento faz-se necessário utilizar uma base de dados em escala adequada. Aliado a essa questão, a escassez de recursos e de tempo leva à necessidade de adoção de novos métodos que tornem os levantamentos de solos mais ágeis e menos onerosos e, portanto, o mapeamento digital de solos pode ser uma alternativa. Recentemente, o mapeamento digital dos solos tem experimentado um rápido desenvolvimento de métodos novos e econômicos, devido à crescente disponibilidade de informações auxiliares, principalmente as imagens de sensoriamento remoto e os atributos do terreno, derivados de modelos digitais de elevação. A pesquisa objetivou utilizar regressão linear múltipla no mapeamento digital de solos, com apoio principal de parâmetros descritores do relevo (geomorfométricos), do mapa geológico e geomorfológico, para a elaboração digital do mapa pedológico para o Distrito Federal (DF). Primeiramente foi avaliada a qualidade dos modelos digitais de elevação (MDE) obtido por meio de carta e SRTM/Topodata reamostrado para 30 metros, para sua aplicação no mapeamento digital de solos no DF, tendo como área de estudo a bacia do Ribeirão do Gama. Ao analisar perfis topográficos, a rede de drenagem derivada, bem como a estatística descritiva de ambos os dados, verificou-se que o MDE obtido por meio de carta apresentou qualidade superior quando comparado ao MDE SRTM/Topodata, porém, as diferenças foram pequenas considerando a escala de obtenção dos MDEs. Em seguida foi elaborado o estudo que aplicou regressão linear múltipla para o mapeamento de solos na bacia do Ribeirão do Gama. Foi realizada a compilação dos perfis de solos já descritos na área de estudo, elaboração de parâmetros derivados dos MDE gerado por meio de carta e MDE SRTM/Topodata (altitude, declividade, aspecto, curvatura total, e acumulação de fluxo) e os mapas geomorfológico e geológico. Para cada perfil de solo foram extraídos os dados referentes a cada parâmetro do terreno, geomorfologia e geologia. Foi então realizada a regressão linear múltipla para a geração do mapa de solos. Verificou-se que apenas a geomorfologia e a declividade MDE gerada por meio de carta foram estatisticamente significantes e nenhuma das variáveis foi significativa utilizando o MDE SRTM/Topodata. A bacia de estudo é uma área pequena e a escala dos dados SRTM/Topodata não foi adequada à essa situação. A acurácia global do mapeamento foi 39,05% e o índice Kappa foi 18,9%, valor esse considerado baixo, porém verificou-se que a metodologia utilizada permitiu mapear os

solos em áreas não amostradas e possibilitou também o mapeamento de solos em áreas já urbanizadas, as quais não possuem mapas de solos. Por fim, foi avaliada a aplicabilidade do MDE SRTM/Topodata, utilizando regressão linear múltipla para o mapeamento digital dos solos em todo o território do DF. O estudo foi dividido em duas etapas: compilação dos perfis de solos já descritos na área de estudo e seus parâmetros derivados (declividade, altitude, forma do terreno, divisores e talvegues, curvatura horizontal, orientação, acumulação de fluxo e índice topográfico de umidade) e os mapas geomorfológico e geológico. Verificou-se que o MDE SRTM/Topodata apresentou desempenho adequado para o mapeamento de solos no DF. A validação do mapeamento gerado por meio da regressão linear múltipla foi realizada utilizando perfis descritos no campo e em uma das áreas avaliadas verificou-se que a acurácia global apresentou resultado satisfatório 44,44% e o índice Kappa 31,56%. Verificou-se que apenas a declividade, altitude e litologia foram relevantes para o mapeamento de solos em todo o território do DF. Verificou-se novamente que a metodologia utilizada permitiu mapear os solos em áreas não amostradas e possibilitou o mapeamento de solos em áreas já urbanizadas.

## ABSTRACT

*In Brazil, in recent years, the process of territorial planning, urban or rural, the search for environment resources preservation and their services, has gained strength. However, for an adequate planning it is necessary to use a good database on an adequate scale. Allied to these questions, there is also a shortage of resources and time leads to the need to adopt new methods that make soil surveys more agile and less costly, and therefore the digital mapping of soils can be an alternative. Recently, the digital soil mapping has experienced a rapid development, with new methods and more economic, mainly due to the increasing of availability of auxiliary information, especially remote sensing images and terrain attributes derived from digital elevation models. The research aimed to use multiple linear regression for digital soil mapping, with relevant primary support descriptors parameters (geomorphometric), and geological and geomorphological map for preparing digital soil map for the Federal District (DF). First was evaluated the quality of digital elevation models (DEM) obtained by means of contour lines and SRTM/Topodata resampled to 30 meters, for its application in digital soils mapping in the Federal District, Gama riverbasin as study area. By analyzing topographic profiles, the derived drainage network, as well as statistic data descriptive of both, of DEM obtained by contour lines exhibited a superior quality when compared to the SRTM DEM/Topodata, but the differences were regarded as small, considering the scale of obtaining DEMs. Then drew up a study that applied multiple linear regression for soil mapping of in the Gama riverbasin. Was performed compilation described soil profiles in the study area; generated parameters by DEM obtained by contour lines and DEM SRTM/Topodata (altitude, slope, aspect, total curvature, and accumulation flow) and the geomorphological and geological maps. For each soil profile was extracted data from each terrain parameter, geology and geomorphology. Multiple linear regression was then performed for the generation the soil map. It was found that only geomorphology and slope generated by MDE obtained by contour lines were statistically significant and none of the variables was significant using the DEM SRTM/Topodata. The study is a small area and the scale of DEM SRTM/Topodata was not suitable for this situation. The overall accuracy of the mapping was 39,05% and Kappa was 18,9%, a value considered low, but it was found that the methodology used to map the soils allowed in areas not sampled and also allowed the mapping of soils in areas already urbanized, which do not have soil maps. Finally, was evaluated the SRTM DEM/Topodata applicability using multiple linear regression for digital*

*soil mapping throughout the DF. The study was divided into two steps: collection of soil profiles as described in study area and its derived parameters (slope, altitude, so Land, dividers and talwegs, horizontal curvature, orientation, flow accumulation and topographic moisture index) and the geomorphological and geological maps. It was found that the SRTM DEM/Topodata presented adequate performance for the mapping of soils in the DF. The validation of the mapping generated by multiple linear regression was performed using profiles described in the field and one of the areas evaluated it was found that the overall accuracy results presented satisfactory 44,44% 31,56% and Kappa index. It was found that only slope, elevation, and lithology were relevant to the soil mapping throughout the DF. It was found again that methodology used allowed to map soils in not sampled areas and allowed the soil mapping in urbanized areas.*



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 - Apresentação .....	1
1.2 - Hipótese e Justificativa .....	2
1.3 - Objetivo.....	4
1.4 - Estrutura da Tese .....	4
<b>CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE</b> .....	5
2.1 - Mapeamento de Solos.....	5
2.1.2.1 - Regressão Linear Múltipla .....	12
2.1.2.2 - Regressão Logística .....	14
2.1.2.3 - Redes Neurais Artificiais .....	16
2.1.2.4 - Árvores de Decisão .....	20
2.1.2.5 - Lógica Fuzzy .....	21
2.1.2.6 - Pesos de Evidência .....	23
2.2 - Modelos Digitais de Elevação.....	24
2.2.2.1 - Dados SRTM/Topodata .....	32
2.3 - Sistemas de Informações Geográficas .....	33
2.4 - Relações Solo, Geologia e Paisagem.....	34
<b>CAPÍTULO 3 - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO CARTA E SRTM /TOPODATA, PARA ESTUDOS DE MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS</b> .....	38
3.1 - Resumo .....	38
3.2 - Abstract.....	39
3.3 - Introdução .....	40
3.4 - Material e Métodos.....	41
3.5 - Resultados e Discussão .....	44
3.6 - Conclusões .....	47
<b>CAPÍTULO 4 - MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS UTILIZANDO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA, NA BACIA DO RIBEIRÃO DO GAMA, DISTRITO FEDERAL</b> .....	48
4.1 - Resumo .....	48
4.2 - Abstract.....	49
4.3 - Introdução .....	50

4.4 - Material e Métodos.....	51
4.5 - Resultados e Discussão .....	56
4.6 - Conclusões .....	59
<b>CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM ó TOPODATA NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS, NO DISTRITO FEDERAL.....</b>	<b>61</b>
5.1 - Resumo .....	61
5.2 - Abstract.....	62
5.3 - Introdução .....	63
5.4 - Material e Métodos.....	65
5.5 - Resultados e Discussão .....	75
5.6 - Conclusões .....	83
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO Ií í í í í í í í í í í .....</b>	<b>98</b>

## LISTA DE ABREVIACOES

**AG** ó Acurácia Global

**AP** ó Acurácia do Mapeador

**AU** ó Acurácia do Usuário

**AVHRR** - *Advanced Very High Resolution Radiometer*

**DVP** ó *Digital Video Plotter*

**DOD** ó Departamento de Defesa

**EMBRAPA** ó Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**GRID** ó grades regulares retangulares

**INPE** ó Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**ITU** ó Índice Topográfico de Umidade

**MDE** ó Modelo Digital de Elevação

**NASA** ó *National Aeronautics and Space Administration*

**NIMA** ó *National Imagery and Mapping Agency* do

**RNA** ó Redes neurais artificiais

**SIG** ó Sistema de Informação Geográfica

**SIR-C/X-SAR** ó *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar*

**SRTM** ó *Shuttle Radar Topography Mission*

**TIN** ó Redes irregulares triangulares

**UTM** - Sistema Universal Transverso de Mercator

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Resultados estatísticos para os MDEs estudados.....	44
<b>Tabela 2.</b> Valores atribuídos às variáveis obtidos dos MDEs e dos planos de informação Geológica e Geomorfológica.....	55
<b>Tabela 3.</b> Valores dos coeficientes de regressão.....	57
<b>Tabela 4.</b> Valores dos coeficientes de regressão.....	57
<b>Tabela 5.</b> Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, usando regressão linear múltipla.....	59
<b>Tabela 6.</b> Valores atribuídos às classes de solos no Distrito Federal.....	72
<b>Tabela 7.</b> Valores atribuídos às variáveis provenientes e geomorfologia (Codeplan, 1984) e geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998 atualizado).....	73
<b>Tabela 8.</b> Valores atribuídos às variáveis obtido por meio do MDE SRTM/Topodata.....	74
<b>Tabela 9.</b> Valores dos coeficientes de regressão.....	75
<b>Tabela 10.</b> Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na bacia do Rio Jardim.....	79
<b>Tabela 11.</b> Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na bacia do Rio São Bartolomeu.....	80
<b>Tabela 12.</b> Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na bacia do Rio Descoberto.....	81
<b>Tabela 13.</b> Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na Fazenda Água Limpa.....	82

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localização da bacia do ribeirão do Gama. ....	42
<b>Figura 2.</b> Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.....	43
<b>Figura 3.</b> Perfil da altitude do modelo digital de elevação gerado a partir de carta (a) e modelo digital SRTM/Topodata (b) na bacia do ribeirão do Gama. ....	44
<b>Figura 4.</b> Curvas de nível restauradas a partir do MDE gerado por meio de carta. ....	45
<b>Figura 5.</b> Curvas de nível restauradas a partir do MDE SRTM/Topodata. ....	46
<b>Figura 6.</b> Direção de fluxo gerado a partir do MDE/Carta e SRTM/Topodata. ....	46
<b>Figura 7.</b> Subtração da altitude MDE gerado por carta e MDE SRTM/Topodata.....	47
<b>Figura 8.</b> Mapa de localização da bacia do Ribeirão do Gama.....	52
<b>Figura 9.</b> Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.....	53
<b>Figura 10.</b> Mapa de localização dos perfis de solos descritos na bacia do Ribeirão do Gama. ....	54
<b>Figura 11.</b> Perfil representativo da distribuição das classes de solos na bacia do ribeirão do Gama. ....	54
<b>Figura 12.</b> Mapa de solos da bacia do ribeirão do Gama (Embrapa, 1978) (A), Mapa de solos gerado por meio da equação 1(B). ....	58
<b>Figura 13.</b> Mapa de localização da área de estudo. ....	66
<b>Figura 14.</b> Mapa geológico simplificado do Distrito Federal. (Fonte: Atualizado de Freitas-Silva & Campos, 1998).....	68
<b>Figura 15.</b> Mapa de solos original com legenda simplificada (Fonte: Embrapa, 2006).....	69
<b>Figura 16.</b> Mapa geomorfológico do Distrito Federal (Fonte: Codeplan, 1984). ....	70
<b>Figura 17.</b> Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.....	71
<b>Figura 18.</b> Mapa de localização dos perfis de solos descritos no Distrito Federal (Fonte: Embrapa, 1978).....	72
<b>Figura 19.</b> Mapa de solos gerado por meio da equação 2.....	77
<b>Figura 20.</b> Mapa de solos original com legenda simplificada (Fonte: Embrapa, 1978).....	78
<b>Figura 21.</b> Mapa localização dos perfis de solos utilizado para validação do mapa gerado por meio da equação 2.....	79

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - Apresentação

No Brasil, a execução de mapeamento de solos é uma demanda permanente, pois é uma forma de buscar informações do meio físico para o planejamento da ocupação racional das terras e para a gestão ambiental, com o intuito de conciliar desenvolvimento econômico e social, com a conservação dos recursos naturais, contemplando assim os requisitos básicos para o desenvolvimento sustentável (Reatto *et al.*, 2008; Chagas, 2006).

Contudo, diversas são as limitações para a obtenção de informações de solos e/ou seus atributos químicos, físicos e biológicos, como o custo elevado dos levantamentos, a grande extensão das áreas a serem mapeadas e por vezes a dificuldade de acesso a determinadas regiões. Além disso, em razão da utilização dos métodos empíricos empregados ao modo de realização do mapeamento de solo, há ainda os problemas de precisão da informação, confiabilidade das interpretações qualitativas e dificuldade de extrapolação da informação obtida para outras áreas (Zhu, 1997, Zhu *et al.* 2001, Burgess & Webster, 1984; McBratney & Webster, 1981; Odeh *et al.*, 1990).

Tradicionalmente, o mapeamento de solos se inicia com a elaboração de um mapa preliminar, onde as unidades de solo são inferidas a partir de fotointerpretação e sobreposição de dados ambientais, que são associados com base no conhecimento e experiência própria do pedólogo (Embrapa, 1995). Após sucessivas atividades de campo, com definição e descrição de perfis amostrais, informações são agregadas a este mapa sendo estabelecidas pelo pedólogo as relações entre os solos e as diferentes paisagens e estabelecendo assim a distribuição espacial e os limites entre as unidades no mapa final (Rezende *et al.*, 2007).

No entanto, o processo de produção tradicional dos mapas de solos convencionais dificulta a atualização rápida e acurada e de baixo custo dos levantamentos de solos. Além disso, existem muitas limitações associadas a este processo, como por exemplo, mudanças sutis nas condições ambientais podem não ser facilmente observadas devido à limitação da percepção visual humana, principalmente quando há a tentativa de processar muitas variáveis simultaneamente. Somado a isso, a interpretação visual de fotografias aéreas é um procedimento dependente da experiência do fotointérprete, demanda muito tempo, é um processo subjetivo e propenso a erros. Como resultado, informações podem ser interpretadas erroneamente durante o procedimento de delineamento dos limites das unidades de solos. E

por fim, a repetição deste processo, para cada atualização de um levantamento de solos, torna a atualização muito ineficiente e cara (Zhu *et al.*, 2001).

Outra limitação no mapeamento dos solos, em especial, no Bioma Cerrado, é a baixa disponibilidade de informações cartográficas em escala de paisagem (1:100.000 ou maior). Nesse Bioma, apenas 2,34% da área possui mapas de solos na escala entre 1:250.000 e 1:100.000 e 0,95% está na escala entre 1:100.000 e 1:20.000. A inexistência de uma política de levantamentos sistemáticos de recursos naturais obriga ao desenvolvimento de modelos robustos e simplificados de caracterização ambiental (Reatto *et al.*, 2008).

Contudo, o uso de técnicas quantitativas para predição espacial em mapeamento de solos e de seus atributos vem crescendo nestes últimos anos, devido ao avanço na capacidade de processamento dos computadores, aliado à disponibilidade de novos métodos matemáticos e estatísticos (McBratney *et al.*, 2000).

Recentemente, o mapeamento digital dos solos tem experimentado um rápido desenvolvimento de métodos novos e mais econômicos, devido, principalmente à crescente disponibilidade de informações auxiliares do meio físico, as imagens provenientes de sensoriamento remoto e os atributos do terreno, derivados de modelos digitais de elevação (Dobos *et al.*, 2000).

Como consequência deste processo de evolução, o levantamento de solos está cada vez mais sofisticado, interdisciplinar, atuando como elo para troca de informações entre especialistas de solos e do meio físico como geomorfólogos e geólogos (Ibañez *et al.*, 1993).

Devido à necessidade urgente e os custos associados ao levantamento de solos, principalmente em níveis de detalhamento maior, é fundamental a utilização de metodologias que visam minimizar estas dificuldades.

Neste contexto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e as geotecnologias têm um grande potencial no mapeamento de solos, devido à velocidade do processamento das informações e o grande volume de dados que estas ferramentas podem gerar. Além de fornecer, associada à informação em diferentes escalas, a precisão dos mapas gerados.

## **1.2 - Hipótese e Justificativa**

No Brasil, nos últimos anos o processo de planejamento territorial, seja urbano ou rural, preconiza a preservação dos recursos e seus serviços ambientais. No entanto, para um adequado planejamento faz-se necessário utilizar uma base de dados em escala adequada. Entre as bases de dados relevantes para este planejamento estão os mapas de solos.

Dada a escassez e a grande demanda de mapeamentos de solos, é necessário e oportuno o desenvolvimento de novos métodos para a sua elaboração. Sendo almejado estabelecer como e quais das técnicas digitais disponíveis permitirão estender suas abordagens às escalas mais operacionais e práticas, visto que na maioria dos países o conhecimento sobre o solo é raro ou rarefeito (Lagacherie *et al.*, 2007), principalmente em países de tamanho continental como Austrália e o Brasil. O Brasil é uniformemente coberto apenas pelo Mapa de Solos do RADAMBrasil - projeto RADAM Solos/EMBRAPA (1:1.000.000 ou nominalmente 2 km) e Zoneamento Agroecológico (diagnóstico ambiental e de agro-sócio-econômico características, (1: 2.000.000 ou nominalmente 4 km) (Lagacherie *et al.*, 2007) Assim, estudos que integram o uso de métodos de integração de informação digital e para predição de classes de solos são relevantes e oportunos.

Neste contexto, a situação do território nacional em especial o Centro-Oeste por tratar-se da fronteira de desenvolvimento nacional, é crítica sobre o ponto de vista da necessidade de informações temáticas básicas, em especial mapas de solos.

Considerando as demandas dos levantamentos de solos e a falta de informações sobre os solos em escala adequada associado à atual capacidade de tratar a variabilidade espacial e temporal dos dados geográficos (topografia, geologia, entre outros), o desafio que se coloca no país é como definir uma nova abordagem para a cartografia dos solos e modo a extrapolar/inferir as informações pontuais conhecidas (perfis) para as áreas desconhecidas.

Parte desta falta de informação advém do processo de mapeamento adotado (Embrapa 1995). Os métodos de levantamento tradicionais são caros, demorados e por vezes não apresentam adequadamente as informações demandadas pelos diferentes usuários (Mendonça-Santos & Santos, 2003). Desta maneira, é necessário o desenvolvimento de pesquisas para a adoção de novas técnicas e métodos para tornar os levantamentos de solos mais rápidos, menos onerosos e mais quantitativos, adequando-os às necessidades dos usuários modernos. Assim, estudos que integram o uso de métodos de integração de informação digital e para predição de classes de solos são relevantes e oportunos.

Neste ínterim a hipótese adotada é que as relações entre os fatores de formação dos solos, tais como litologia e relevo podem ser modelados por meio de processos numéricos, estatísticos e geoestatísticos buscando assim a elaboração de mapas de solos de qualidade.



### **1.3 - Objetivo**

O presente estudo tem como objetivo aplicar o modelo de regressão linear múltipla para o mapeamento de solos, utilizando distintos modelos digitais de elevação, no Distrito Federal.

#### **1.3.1 - Objetivos Específicos**

Recuperar, organizar e utilizar dados provenientes dos levantamentos de solos realizados no Distrito Federal, em sistema de informação geográfica;

Comparar a utilização de modelos digitais de elevação provenientes de diferentes fontes e em diferentes escalas no mapeamento de solos do Distrito Federal;

Verificar a relação dos atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação, da geomorfologia e da geologia na distribuição dos solos na Bacia do Ribeirão do Gama e no Distrito Federal;

Avaliar a acurácia do modelo de regressão linear múltipla na predição de classes de solos no Distrito Federal.

### **1.4 - Estrutura da Tese**

A tese compreende seis capítulos. O segundo capítulo trata de uma revisão da literatura acerca das metodologias utilizadas nacional e internacionalmente para o mapeamento digital de solos.

O terceiro capítulo versa sobre a qualidade dos modelos digitais de elevação obtida por meio de carta topográfica e SRTM reamostrado para trinta metros do projeto Topodata.

O quarto capítulo trata da aplicação da regressão linear múltipla e de dois modelos digitais de elevação para o mapeamento digital de solos na bacia do Ribeirão do Gama, localizado no Distrito Federal. Baseado nas conclusões obtidas no quarto capítulo foi elaborado o quinto capítulo, que aplica a mesma técnica para uma área mais extensa, abrangendo todo o Distrito Federal.

Por fim, são apresentadas as conclusões e as considerações finais no capítulo seis.

## **CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE**

### **2.1 - Mapeamento de Solos**

O levantamento é um prognóstico da distribuição geográfica dos solos como corpos naturais, determinados por um conjunto de relações e propriedades observáveis na natureza. Identifica e separa unidades de mapeamento, além de prever e delinear suas áreas nas paisagens. Assim sendo, pode-se dizer que o levantamento pedológico trabalha com unidades de mapeamento gerando como produto final mapa(s) e relatório(s) (Embrapa, 1995).

Os levantamentos de solos englobam trabalhos prévios de escritório (mapa preliminar), levantamento a campo (amostragem e observação), análises laboratoriais e interpretação dos dados com a elaboração do mapa e relatório técnico final (Ranzani, 1969). Dessa forma, o objetivo principal de um levantamento pedológico é subdividir áreas heterogêneas em parcelas mais homogêneas, que apresentem a menor variabilidade possível, em função dos parâmetros de classificação e das características utilizadas para distinção dos solos, em uma dada escala (Embrapa, 1995).

As informações contidas num levantamento pedológico são essenciais para a avaliação do potencial e das limitações de uma área, constituindo uma base de dados para estudos de viabilidade técnica e econômica de projetos e planejamento de uso, manejo e conservação de solos (Embrapa, 1995).

Os métodos de levantamentos e mapeamento de solos podem ser descritos por duas abordagens: a primeira, clássica ou tradicional, intitulada de método CIORPT, estabelecida por Dokuchaev (1883) nos primórdios da Ciência do Solo, a qual estabelece que o solo é resultado da interação entre cinco fatores: clima (C), organismos (O), relevo (R), material de origem (P) e tempo (T). Os quatro primeiros fatores interagindo no tempo, criam uma série de processos específicos que levam à diferenciação em horizontes e, conseqüentemente, à formação do solo. Jenny (1941) adicionou a essa equação, o tempo, como uma variável independente,  $S = f(\text{CIORPT})$ , enquanto as outras são variáveis dependentes.

Uma segunda abordagem denominada de método híbrido que é uma combinação de técnicas dos métodos CIORPT e técnicas quantitativas, que vem sendo desenvolvidas a fim de melhorar as predições das propriedades dos solos (McBratney *et al.*, 2000).

### 2.1.1 - Mapeamento de Solos Tradicional

O mapeamento de solos tradicional é fundamentado no conceito de solos como um corpo natural, com características próprias, que compõe as paisagens, sendo essas unidades de referência, estabelecidas artificialmente pelo homem, para atender aos diversos esquemas de classificação taxonômica de solos (Cline, 1949).

O levantamento é então um prognóstico da distribuição geográfica dos solos como corpos naturais, determinados por um conjunto de relações e propriedades observáveis na natureza. O levantamento de solos identifica e separa unidades de mapeamento, prevê e delinea suas áreas nos mapas. Assim sendo, pode-se dizer que o levantamento pedológico trabalha com unidades de mapeamento gerando como produto final mapa(s) e relatório(s) (Embrapa, 1995)

Na abordagem CIORPT, a taxonomia de solos, é o modelo usado pelo profissional da ciência do solo, o pedólogo, para criar e distinguir as classes de solos e estabelecer seus limites. Esse é um modelo mental, intuitivo, determinístico e que assume a existência de uma forte correlação entre os tipos de solos e os ambientes onde eles se ocorrem.

Os inventários do solo têm como principal objetivo subdividir áreas heterogêneas em parcelas homogêneas, de modo que apresentem a menor variabilidade possível, em função dos critérios de classificação e dos atributos utilizados para sua distinção (McBratney & Webster, 1981).

As características dos solos são baseadas num modelo discreto e descreve propriedades dos solos de uma determinada área, classificando-os de acordo com um sistema taxonômico vigente, além de estabelecer limites entre classes definidas e permitir fazer inferências sobre o comportamento dos solos quanto ao uso e ao manejo. Conforme Jenny (1941) o modelo é baseado no pressuposto de que fatores de formação controlam a distribuição dos diferentes solos na paisagem.

Assim, os métodos tradicionais de levantamentos de solos apóiam-se, principalmente, em observações de campo, cujo número e intensidade por área mapeada variam conforme a escala e o nível de detalhe esperado. Esses métodos foram sempre fundamentados em observações pontuais, observações ao longo de transectos que cruzam a paisagem e observações por áreas selecionadas para estudos mais detalhados.

Os métodos usuais de prospecção para fins de coleta de dados, descrição de características dos solos no campo e a verificação de limites entre unidades de mapeamento, compreendem as investigações ao longo de transeções, levantamentos de áreas-piloto, estudos

de toposseqüências, sistema de malhas e o método do caminhar livre. O método de transeções consiste de observações por meio de caminhos planejados para detectar, além das características dos solos, o máximo de variações da paisagem. Já os levantamentos de áreas-piloto são indicados para mapeamentos de natureza genérica e constam de investigações minuciosas de áreas menores, representativas de uma determinada feição fisiográfica e, posteriormente, extrapolada para o restante da área. No método de prospecção ao longo de toposseqüências, os solos e suas variações são correlacionados com as superfícies geomórficas em que ocorrem. Para projetos de uso intensivo de solos, em que levantamentos detalhados e ultradetalhados o planejamento de coleta de amostras, observações de campo e estudo da variabilidade dos solos é feito, normalmente, mediante utilização de sistema de malhas. Neste método, as caracterizações se processam a espaços prefixados de modo a formar um reticulado denso (malha) em toda a extensão da área. Por fim, pelo método do caminhar livre, pedólogos usam a própria experiência, o conhecimento sobre a área, a fotointerpretação e as correlações para definir os pontos de observação e amostragem, geralmente locais representativos, de modo que cada observação ou amostra coletada forneça o máximo de informações para o mapeamento e caracterização dos solos (IBGE, 2007).

Com base nestes conceitos, pressupostos e, principalmente, experiência, os pedólogos aprendem a interpretar características locais de topografia e vegetação como indícios de combinações dos fatores de formação dos solos e podem inferir os limites entre classes e inferir propriedades dos solos dentro dos limites de classes, mas seu paradigma é cientificamente inadequado, porque ignora ambos, a variabilidade espacial dos fatores de formação do solo e do próprio solo resultante (Burrough & McDonnell, 1998). Além disso, sua representação espacial tem sido sempre discreta, com limites abruptos entre as unidades de mapeamento.

Vários autores têm criticado os aspectos subjetivos do método tradicional, dentre eles, Burgess *et al.*, 1981; McBratney & Webster, 1981; Burgess & Webster, 1984 e Burrough, 1989 têm discutido o fato de ser este, de caráter discreto (Lark & Beckett, 1998), em oposição ao modelo contínuo, o que implica assumir que as classes de solos possuem limites abruptos. Isto significa dizer que em geral, cada unidade de mapeamento representa uma característica pedológica constante ou um determinado tipo de solo.

A precisão e a eficácia de levantamentos efetuados desta forma são limitadas, segundo Zhu, (1997) e Zhu *et al.*, (2001), principalmente pela técnica de cartografia baseada em polígonos e pelo processo manual de produção do mapa de solo. Diversos autores (McBratney & Webster, 1981; Burgess & Webster, 1984; Odeh *et al.*, 1990), discutem que o método

tradicional não considera a dependência espacial entre as unidades de mapeamento, a qual pode ser forte, principalmente em se tratando de levantamentos detalhados ou em áreas onde os limites entre os solos não são óbvios. Conseqüentemente, o modelo discreto, assumido no mapeamento tradicional não é geralmente realístico, porque os limites naturais na paisagem tendem a ser mais graduais que abruptos.

Entretanto, a subjetividade em trabalhos de levantamento de solos é reconhecida e também discutida. Pode-se então deduzir que a delimitação das unidades de solos depende do conhecimento tácito adquirido por meio da prática do cientista. Hudson (1992), afirma que pessoas que adquiriram conhecimento tácito raramente são capazes de explicá-los aos outros. Além disso, são incapazes de explicar o porquê da tomada de uma decisão quando usam conhecimento adquirido pela experiência.

Somado a essas características, o levantamento tradicional é uma atividade onerosa, que demanda tempo e muitos deslocamentos ao campo. Além disto, a crescente preocupação ambiental e o grande desenvolvimento da agricultura de precisão demandaram novos levantamentos de solos em escala compatível com estes objetivos (McBratney *et al.*, 2003).

Torna-se, portanto, cada vez mais necessário introduzir na pesquisa cartográfica dos solos, ferramentas que possam auxiliar os procedimentos básicos de delimitação das unidades de solos em imagens de forma sistemática, permitindo a redução da subjetividade.

O interesse em métodos de processamento digital de imagens decorre de duas áreas principais de aplicação: melhoria de informação visual para a interpretação humana e o preparo de dados de cenas para análise automática (Ribeiro, 2003).

### **2.1.2 - Mapeamento Digital de Solos**

Para dirimir as incertezas inerentes ao método tradicional de levantamento de solos, novas abordagens de modelagem quantitativa dos solos têm sido propostas, a fim de descrever, classificar e definir os padrões de variação espacial dos solos na paisagem, de forma a melhorar o conhecimento da variabilidade espacial dos solos, da precisão e da qualidade da informação, por meio de diversas técnicas quantitativas (Webster, 1984).

Essas novas abordagens vêm atender as novas demandas da sociedade pela informação, fazendo emergir novas áreas de interesse como qualidade do solo e do ambiente, reconhecimento de processos de degradação e enfoques em poluição do solo. Estas demandas têm dado aos levantamentos de solos um foco maior em modelagem quantitativa com o acompanhamento de questões envolvendo acurácia e incertezas (McBratney *et al.*, 2000).

Assim, o mapeamento digital de solos é a criação de sistemas de informação espacial, utilizando modelos numéricos para a inferência das variações espaciais e temporais dos tipos de solos e de suas propriedades, a partir de observações e conhecimento dos solos e de variáveis ambientais correlacionadas (Lagacherie *et al.*, 2007).

Estudos quantitativos em solos têm sido desenvolvidos na área da ciência do solo denominada Pedometria, podendo ser definida como o desenvolvimento de modelos numéricos ou estatísticos das relações entre variáveis ambientais e o solo, os quais são então aplicados a um banco de dados geográfico para criar um mapa preditivo (Scull *et al.*, 2003).

A pedometria inclui também as técnicas de geoestatística, as quais têm sido amplamente aplicadas à ciência do solo (McBratney & Webster, 1981; Burgess *et al.*, 1981).

O surgimento da pedometria recentemente se tornou necessário para avaliar a precisão e exatidão das afirmativas sobre as classes e atributos dos solos, bem como para tornar os procedimentos mais reproduzíveis e os resultados mais comparáveis (McBratney e Gruijter, 1992).

McBratney *et al.* (2000) formularam uma proposta quantitativa para a equação elaborada por Jenny (1941) e propuseram aliar em um modelo determinístico-estocástico, o conhecimento pedológico sobre os processos de formação e distribuição dos solos na paisagem (método CIORPT), com técnicas quantitativas utilizadas em pedometria, com a finalidade de prever com maior rapidez e precisão, e a um custo menor, as classes de solos ou as propriedades destes para uma determinada região.

Segundo McBratney *et al.* (2000), as técnicas pedométricas são utilizadas para analisar dados com o objetivo de tornar os inventários de solos quantitativos, mais eficientes e mais baratos. Existe uma variedade de técnicas disponíveis para a análise da distribuição espacial do solo. Os métodos mais comumente utilizados são a geoestatística, a estatística clássica e a combinação destas duas.

Os métodos CIORPT são baseados no modelo determinístico empírico originado dos fatores de formação do solo de Jenny (1941). Muitos dos primeiros estudos, que utilizaram a função CIORPT, foram baseados na regressão linear simples-bivariada e geral, embora modelos de regressão polinomial múltipla tenham sido também aplicados. No entanto, muitos destes estudos não acomodam a não linearidade nas relações, por isso, as recentes aplicações estão utilizando métodos mais robustos tais como, modelos lineares generalizados, modelos aditivos generalizados, árvores de regressão e redes neurais. A desvantagem dos métodos CIORPT é que eles, embora tratem satisfatoriamente bem com as relações determinísticas,

não são adequados para tratar com as autocorrelações espaciais das propriedades dos solos, especialmente a nível local (McBratney *et al.*, 2000).

Esta abordagem resultou provavelmente do advento dos primeiros sistemas de informações geográficas e também possivelmente como uma resposta pedológica aos geoestatísticos (McBratney *et al.*, 2003). Segundo McKenzie & Ryan (1999), uma análise completa das vantagens das diferentes estratégias de correlação ambiental ainda precisa ser realizada para os levantamentos de solos. No entanto, os modelos de correlação ambiental podem ser usados na estimativa da distribuição espacial dos solos e podem formar uma base para uma abordagem mais científica dos levantamentos.

Os métodos geoestatísticos são baseados na teoria das variáveis regionalizadas que permite considerar a variabilidade espacial de uma propriedade do solo como resultado de uma função aleatória representada por um modelo estocástico. As principais limitações da técnica geoestatística univariada da krigagem advém da hipótese de estacionaridade, que freqüentemente não é encontrada em conjuntos de dados de campo, e os requerimentos de grandes quantidades de dados para definir a autocorrelação espacial. A krigagem também tem seu uso limitado em situações de complexidade do terreno onde os processos de formação do solo são complexos (McBratney *et al.*, 2000).

Visto que, tanto o solo como os fatores exógenos são multivariados, a escolha mais adequada deve ser uma combinação de análises univariadas e multivariadas, usando os fatores CIORPT e os métodos geoestatísticos, os denominados métodos híbridos. Nos casos em que uma variável do solo está determinísticamente relacionada a alguns fatores causais, ou seja, exibe uma tendência, a *krigagem* univariada ordinária não é apropriada. Nestes casos, métodos híbridos, tais como a *krigagem* universal, *co-krigagem*, *krigagem*-regressão, *krigagem* com tendência externa e *krigagem* fatorial, são mais adequados (McBratney *et al.*, 2000).

Segundo Matheron (1965) a geoestatística tem suas bases na teoria de variáveis regionalizadas, e considera a variabilidade espacial das propriedades dos solos como realizações de uma função aleatória, a qual pode ser representada por um modelo estocástico.

Burgess & Webster (1980) aplicaram o método geoestatístico denominado *krigagem* para a interpolação espacial dos solos. Com relação aos solos, a aplicação de técnicas de geoestatística univariada não é muito apropriada, em se tratando de ambientes mais complexos, onde os processos de formação dos solos se combinam de maneira também complexa.

Outra técnica quantitativa utilizada em pedometria para lidar de uma maneira quantitativa com a imprecisão, é a lógica e os conjuntos nebulosos (*fuzzy logic*). Essa técnica, introduzida por Zadeh (1965), permite trabalhar com classes indefinidas e com limites indeterminados, ou seja, conceitos não exatos. Os conjuntos *fuzzy* foram primeiramente aplicados às análises de agrupamentos *cluster analysis*, por Ruspini, (1969). Em seguida, os conjuntos *fuzzy* foram desenvolvidos como *fuzzy-c-means* e posteriormente chamados *fuzzy-k-means* por De Grujter & McBratney (1988), para criar classes contínuas, bem mais flexíveis que o método tradicional, permitindo que um mesmo indivíduo pertença, em diferentes proporções a diferentes classes.

Algumas técnicas de Inteligência Artificial como árvores de decisão e redes neurais também vêm sendo utilizadas em Ciência do Solo. As árvores de decisão podem ser aplicadas quando há interações complexas entre os atributos e o objetivo é produzir um sistema capaz de identificar padrões e reconhecê-los em análises futuras (Quinlan, 1986). Uma solução para esse tipo de situação é a construção de uma estrutura hierárquica de regras chamada de *decision/classification trees*. As árvores de decisão/classificação podem ser pensadas como um tipo de chave taxonômica múltipla automatizada. A classificação se executa em respondendo uma série de questões sobre os atributos observados.

Já as redes neurais constituem modelos matemáticos capazes de imitar ou de trabalhar de forma similar ao cérebro humano. A rede é constituída de vários *neurons* que são conectados por canais de comunicação *connectors*. Esses conectores contêm os dados numéricos, os quais são arranjados de diferentes maneiras e organizados em camadas. Os dados podem receber pesos diferentes e não existe uma estrutura assumida para o modelo. As redes são de fato, ajustadas ou *treinadas* para responder a uma determinada demanda (Hengl, 2003).

O mapeamento pedométrico é geralmente caracterizado como uma produção geoestatística quantitativa da geoinformação do solo. Este usualmente é concluído com a produção de um mapa no formato matricial e uma medida da incerteza deste mapa. O mapeamento pedométrico é também referido como mapeamento digital do solo, já que este depende enormemente do uso de tecnologias da informação, embora, de modo específico signifique que na produção da geoinformação do solo são utilizados, principalmente, métodos quantitativos (Hengl, 2003).

A abordagem pedométrica para o mapeamento do solo é bastante diferente da abordagem convencional. As diferenças entre estas são sumarizadas a seguir: o levantamento de solos convencional é baseado na fotointerpretação e predição dos tipos de solos, enquanto



as técnicas pedométricas são, principalmente, baseadas nas propriedades do solo, produzidas com a utilização de alguma técnica geoestatística. O levantamento convencional produz mapas de polígonos de solos e os produtos das técnicas pedométricas são mapas de propriedades dos solos de grande escala (Hengl, 2003) e por fim também diferem no processo de determinação da escala, que passa a ser estabelecida por meio de resolução (Lagacheire *et al.*, 2007).

### 2.1.2.1 - Regressão Linear Múltipla

O uso de regressões lineares provavelmente seja o método mais disseminado no meio científico para estudar a relação entre as variáveis ou fazer previsões. As regressões lineares múltiplas assumem a existência de uma relação linear entre a variável dependente e duas ou mais variáveis independentes. Por exemplo, no caso de três variáveis independentes a regressão linear múltipla pode ser escrita como a equação 1 abaixo:

$$Y = a + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 \quad (1)$$

onde Y é a variável dependente (ou variável resposta), x1, x2 e x3 são as variáveis independentes, a é o intercepto e b1, b2 e b3 são os coeficientes angulares das variáveis independentes (x1, x2 e x3, respectivamente). O intercepto apresenta o valor de Y quando os valores das variáveis independentes for zero, e o coeficiente indica a taxa de alteração de Y para cada unidade de incremento na variável independente correspondente (Bailey *et al.*, 2003).

Em geral a equação de regressão linear múltipla é calculada por meio do método de mínimos quadrados e o grau de associação entre a variável dependente e as variáveis independentes é expresso pelo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), cuja significância estatística é avaliada com base no teste F ou teste t.

De acordo com McBratney *et al.* (2003) o sucesso ao se ajustar uma função para descrever o solo depende do número de variáveis de predição observadas em determinado local, da densidade de amostras para estabelecer uma dada relação, da disponibilidade e flexibilidade de funções para ajuste de relações não lineares e da relação entre solo e meio ambiente.

Dentre os modelos lineares mais utilizados em ciência do solo podem ser citados os modelos de regressão para estimar propriedades, e classificações para as estimativas de

classes de solo, tais como (Moore *et al.* 1993; Arrouays *et al.* 2001; Skidmore *et al.* 1997; Hengl *et al.* 2002; Florinsky *et al.* 2002; Thompson *et al.* 2001; Lee *et al.* 1998; Frazier e Cheng, 1989).

Além disso, modelos de regressão têm sido amplamente aplicados para estimativas em representações espaciais de solo, associado, por vezes, com métodos de interpolação. Moore *et al.* (1993) estabeleceram a relação entre atributos de terreno e propriedades de solo por meio de regressão linear múltipla para estimar espessura de horizonte A e pH e verificou que esse método pode ser aplicado como um primeiro passo para guiar a amostragem de solos e o desenvolvimento de modelos em área não mapeadas. Arrouays *et al.* (1995) estimaram o conteúdo de C orgânico no solo a partir da matéria orgânica, textura, bem como variáveis climáticas (chuva e temperatura) e de terreno (declive), além da ocupação do solo no sul da França e verificaram que a distribuição do C orgânico apresenta forte relação espacial, sendo o teor de argila o principal fator influente.

Skidmore *et al.* (1997) utilizaram imagens *Landsat* e amostras de solo para estimativa de teor de P e valor de pH por meio de regressão linear em uma área silvícola na Austrália e verificaram que o teor e o valor de pH foram correlacionáveis com o a imagem *Landsat TM*. Hengl *et al.* (2002) mapearam pH e matéria orgânica utilizando parâmetros de vegetação extraídos de imagens AVHRR, parâmetros de terreno (elevação, curvatura, declividade, índice de umidade), parâmetros climáticos (regime de chuvas e temperatura) e observações de solos do levantamento nacional Croata. Verificaram que a predição da matéria orgânica apresentou melhores resultados do que o pH.

Bishop & McBratney (2001) utilizaram MDE, fotos aéreas, imagens *Landsat TM*, dados de monitoramento de colheita, condutividade elétrica e 113 amostras de solo para estimar a capacidade de troca de cátions ó CTC, por meio de regressão linear múltipla, modelos aditivos, árvores de regressão, *krigagem* dos resíduos desses modelos, *krigagem* ordinária e *krigagem* com deriva externa. A *krigagem* com deriva externa e as *krigagem* dos resíduos da regressão linear múltipla e da árvore de regressão foram os métodos que mais se destacaram.

Odeh & McBratney (2000) compararam quatro métodos para estimar teores de argila no solo, sendo a regressão linear múltipla com conjunto de treinamento externo, regressão linear múltipla com conjunto de treinamento interno, *krigagem* com função intrínseca de ordem 1 (IRF1) e *krigagem* dos resíduos do modelo de regressão. A *krigagem* dos resíduos da regressão foi o método que melhor incorporou a imagem AVHRR, enquanto os resultados da IRF1 mostraram-se muito suavizados e os modelos de regressão pobres.

Entretanto, com a finalidade de melhoria da capacidade de predição variáveis independentes, sugere-se a incorporação de variáveis adicionais que expliquem o fenômeno em questão, mesmo que os testes de significância apresentem somente resultados satisfatórios com a regressão linear simples. Isto é, reduzir o coeficiente do intercepto, o qual, em regressão, significa a parte da variável dependente explicada por outras variáveis, que não a considerada no modelo. Reduzindo-se a variância residual (erro padrão da estimativa), aumenta a força dos testes de significância e eliminar a tendenciosidade.

### **2.1.2.2 - Regressão Logística**

Recentemente, tem crescido o interesse acerca do emprego de regressões nominais logísticas como método preditivo. Essas regressões estabelecem relações matemáticas entre variáveis dependentes discretas e variáveis independentes contínuas ou discretas. Campling *et al.* (2002), por exemplo, empregaram as regressões logísticas na predição da probabilidade espacial da ocorrência de classes de drenagem de solos usando atributos derivados do modelo numérico de terreno e índices de vegetação por meio de imagens *Landsat-5* em região tropical úmida da Nigéria, com acurácia entre o mapa de solos original e o mapa estimado variando de 95 a 65 %, à medida que aumentava o grau de detalhamento com a separação das classes.

As regressões logísticas podem estabelecer relações matemáticas entre uma, duas ou mais variáveis preditoras contínuas e até mesmo descontínuas com uma variável resposta descontínua apresentando várias classes, sendo o caso de várias classes uma adaptação ao modelo original conhecido por regressão logística binária.

Estas regressões se assemelham às regressões lineares comuns, entretanto diferem quanto ao tipo de variável resposta discreta e por se caracterizarem por um comportamento sigmóide de sua curva. As regressões logísticas apresentam duas funções principais: descritiva, descrevendo a natureza do relacionamento entre a resposta e uma ou mais variáveis regressoras e preditiva, sendo capaz de identificar a reincidência de determinada resposta se as variáveis regressoras se repetirem (Hosmer & Lemeshow, 1989).

As funções resposta são, portanto, denominadas de regressões logísticas múltiplas, cuja expressão para predizer a ocorrência de uma das classes de uma variável resposta a partir de uma variável preditora.

As regressões logísticas têm a desvantagem de não possuírem um valor de  $R^2$  como as regressões comuns, necessitando-se assim de estratégias mais complexas para excluir

variáveis preditoras desnecessárias do modelo, bem como para verificar a adequação do modelo quanto à estimativa de resposta (Wong & Mason, 1985).

O método para seleção de variáveis preditoras foi o método iterativo *stepwise*, ou passo a passo, interagindo-se com a resposta das análises de regressão, para adicionar ou remover variáveis explanatórias do modelo, assim como efeitos de curvatura e de interação. O método é similar ao modelo de regressão linear, onde se verifica se um subconjunto das variáveis X podem ser retiradas do modelo de regressão logística múltiplo, isto é, testar se os coeficientes de regressão são iguais a zero, e, para este fim usa-se o Teste da Razão de Verossimilhança, que é baseado na estatística chamada de desvio do modelo.

O desvio de um modelo compara o logaritmo da verossimilhança deste modelo com o logaritmo da verossimilhança do modelo completo. Um modelo completo se ajusta completamente aos dados, ou seja, para cada observação tem-se um parâmetro.

Para validação do modelo deve-se considerar que novos dados (uma nova amostra) ou, então, uma amostra reservada dos dados, deveria ser usada para verificar se o mesmo modelo pode ser usado com estes dados novos, se os coeficientes de regressão e os erros padrões são similares e se as mesmas conclusões ou inferências seriam obtidas.

Contudo, de acordo com Rossiter (2004), ao se trabalhar com álgebras de mapas, utilizando regressão logística para isso, outra forma de se verificar a adequação seria por meio do uso de métodos de verificação de acurácias dos solos, como método de acurácia geral, acurácia do mapeador, acurácia do usuário de mapas e o coeficiente Kappa de Cohen.

O emprego de regressões logísticas múltiplas na Ciência do Solo se concentra mais a regressões binárias e a predição de atributos de solos e que Bailey *et al.* (2003) utilizaram para estimativa de classes de solos na Inglaterra. Os autores usaram um mapa de solos pré-existente na escala 1:250.000, com base no modelo digital de elevação (MDE), calcularam as variáveis elevação ponderada, declividade e aspecto, os autores verificaram correspondências entre os valores estimados e a verdade de campo variando de 47% a 65% em três formas de relevo, plano, vale e escarpado. Concluíram que este é um método válido para estimativa de classes de solo. Figueiredo (2006) utilizou técnicas de regressão logística múltiplas para mapeamento de classes de solos do Rio Grande do Sul e concluiu que esta técnica tem potencial para ser utilizado para esse fim e que os resultados são dependentes da qualidade do MDE e da escala do mapa original.

É uma técnica muito mais flexível, pois não tem qualquer exigência para sua aplicação a respeito da distribuição das variáveis explicativas, não necessitando ter distribuição normal,

correlação linear, medidas em mesma escala ou homogeneidade de variância (Chatterjee *et al.*, 2000).

Debella-Gilo *et al.* (2007) utilizaram regressão logística nominal e modelo digital do terreno para prever a distribuição espacial de classes de solos na porção nordeste da Noruega e verificaram que dos mais de cinquenta parâmetros derivados do modelo digital do terreno, apenas seis foram significantes na determinação da distribuição espacial dos solos.

De acordo com, Figueiredo (2006) regressões nominais logísticas estabelecem relações matemáticas entre variáveis independentes contínuas ou discretas e variáveis dependentes discretas. Essas foram avaliadas quanto ao seu potencial em prever a ocorrência e distribuição de classes de solos na região dos municípios de Ibirubá e Quinze de Novembro (RS). A partir de um MDE com 90 m de resolução, foram calculadas variáveis de terreno topográficas (elevação, declividade e curvatura) e hidrográficas (distância dos rios, índice de umidade topográfica, comprimento de fluxo de escoamento e índice de poder de escoamento). Observou-se acurácia geral (AG) de 58 % e acurácia pelo coeficiente Kappa de Cohen de 38 %, comparando-se o mapa original com o mapa estimado dentro da escala original.

### **2.1.2.3 - Redes Neurais Artificiais**

As redes neurais artificiais (RNA) são uma linha de pesquisa da Inteligência Artificial, que visa investigar a possibilidade de simulação de comportamentos inteligentes por meio de modelos baseados no funcionamento do cérebro humano. São compostas por unidades de processamento simples operando em paralelo. Estas unidades de processamento foram inspiradas nos sistemas biológicos dos neurônios.

É uma técnica de inteligência artificial e da mesma família dos sistemas especialistas e abordagens baseadas em conhecimento para aprendizagem (Key *et al.*, 1989). As principais vantagens das redes neurais são: a possibilidade de manipulação eficiente de grandes quantidades de dados e sua capacidade de generalização. Entretanto, as principais razões para seu uso são de que as redes neurais não assumem nenhum tipo de distribuição dos dados a priori, diferentemente da abordagem estatística paramétrica tradicional, que assume que os dados possuem uma distribuição normal; e a habilidade para manipular dados adquiridos de diferentes fontes e com diferentes níveis de precisão e ruídos.

Pode-se afirmar que a RNA é um esforço matemático para simular, em parte, o funcionamento do cérebro humano por meio de uma rede de elementos de processamento

unitários que juntos, e funcionando em paralelo, simulariam o fluxo de informações do cérebro humano (McBratney *et al.*, 2003).

Assim sendo, existem redes neurais de camada simples (*Perceptron*) constituídas por um grupo de neurônios arranjados em apenas uma camada, e as redes multicamadas (*Perceptron* Multicamadas), formadas por várias camadas intermediárias ou pela combinação de várias redes de camadas simples (Venturieri & Santos, 1998).

A topologia de uma RNA refere-se à maneira como os elementos de processamento são organizados, o que afeta o desempenho da rede, uma vez que sua estrutura está intimamente relacionada com o algoritmo de aprendizado usado na fase de seu treinamento. Dentre as redes mais usadas pode-se citar a *Perceptron* Multicamadas, que é formada de: camada de entrada, onde os dados de entrada são apresentados à rede; camadas intermediárias ou ocultas, onde é feita a maior parte do processamento, através de conexões que ponderam as entradas por meio de pesos e podem ser consideradas como extratoras de características; camada de saída, onde recebe os valores já processados pela rede. O arranjo destes neurônios pode assumir diferentes formas variando na natureza da ligação entre camadas, o número de camadas e o número de neurônios por camadas, o que é denominado de arquitetura da RNA (Ito *et al.*, 2000).

Existem diversos tipos de RNA e diferentes maneiras de classificá-las. Talvez a mais importante seja quanto à forma de aprendizado que pode ser supervisionada e não supervisionada. No aprendizado supervisionado são sucessivamente apresentadas à rede conjuntos de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída. Durante este processo, a rede realiza um ajustamento dos pesos das conexões entre os elementos de processamento, segundo uma determinada lei de aprendizagem, até que o erro entre os padrões de saída gerados pela rede alcancem um valor mínimo desejado. Um outro tipo de aprendizagem similar à supervisionada é a aprendizagem por reforço. Neste tipo de aprendizagem, ao invés de fornecer as saídas corretas para a rede, relativo a cada treinamento individual, a rede recebe somente um valor que diz se a saída está correta ou não (Hecht-Nielsen, 1990).

No aprendizado não-supervisionado a rede analisa os conjuntos de dados apresentados a ela, determina algumas propriedades dos conjuntos de dados e aprende a refletir estas propriedades na sua saída. A rede utiliza padrões, regularidades e correlações para agrupar os conjuntos de dados em classes. As propriedades que a rede vai aprender sobre os dados podem variar em função do tipo de arquitetura utilizada e da lei de aprendizagem. Por exemplo, Mapa Auto-Organizável de Kohonen, Redes de Hopfield e

Memória Associativa Bidirecional, são alguns métodos de aprendizado não-supervisionado (Hecht-Nielsen, 1990).

As redes também podem ser classificadas quanto à suas características, que pode ser contínua, discreta, determinística e estocástica, ou quanto à sua estrutura: redes de múltiplas camadas - *multilayer feedforward network*, cujo fluxo de dados segue uma única direção e redes recursivas - *recurrent network*.

As redes neurais têm uma ampla possibilidade de aplicação, como em relação ao sensoriamento remoto, onde maior atenção tem sido dada ao reconhecimento de padrões. A habilidade para aprender por meio de exemplos e para generalizar torna as redes neurais artificiais atrativas para a classificação supervisionada de dados do sensoriamento remoto (Schalkoff, 1992).

Como principais características das RNA, segundo Bittencourt (1998), podem ser citadas:

a) capacidade de aprender (treinar) por exemplos e de generalizar este aprendizado, aplicando-o a situações antes não confrontadas ou não apresentadas previamente;

b) bom desempenho em tarefas mal definidas, nas quais falta o conhecimento explícito sobre como encontrar uma solução e,

c) não requerer conhecimento a respeito de eventuais modelos matemáticos dos domínios da aplicação (processam informações espaço/temporais).

A propriedade mais importante da RNA, de acordo com Bittencourt (1998) é a habilidade de aprender e com isso melhorar seu desempenho. Este aprendizado é realizado por meio de processos interativos de ajustes aplicados aos seus pesos, chamado de treinamento. O aprendizado só ocorre quando a RNA atinge uma solução generalizada para o problema proposto. Os pesos são ajustados de acordo com os padrões amostrais das classes, previamente apresentados. Isso afirma que a rede aprende por exemplos. A RNA supervisionada passa pelo processo de treinamento a partir de um conjunto de dados reais, diferindo da computação programada, a qual necessita de um conjunto de regras pré-fixadas e algoritmos.

A utilização de redes neurais para predição de classes de solos não são muito frequentes na literatura mundial e têm sido aplicadas para reconhecimento de padrões. Nessa perspectiva, Rojas (2004), relata que as redes neurais desempenham bem esta tarefa ou melhor que as técnicas estatísticas, uma vez que não requerem que a natureza paramétrica da distribuição dos dados a ser classificados seja explícita. Sendo assim, as RNA são baseadas em uma arquitetura de elementos de processamento simples de entrada e saída, parecido aos neurônios

no cérebro humano, e estão demonstrando sucesso em uma ampla variedade de aplicações, incluindo processamento e interpretação de dados de sensores remotos (Atkinson & Tatnall, 1997).

Costa & Filho (2009) utilizaram um sistema de redes neurais artificiais para a classificação supervisionada de mapas evidenciais multifonte, visando a análise de possíveis padrões ocultos contidos nesses dados que tenham associação espacial a locais ricos em PB e verificaram que o sistema de redes neurais se mostrou eficiente no reconhecimento de padrões de teor de PB em solos.

Para classificar amostras de Latossolos e Argissolos de diferentes regiões geográficas do Estado de São Paulo, por meio de seus espectros na região do infravermelho próximo (reflectância difusa) Fidêncio *et al.* (2001) utilizaram dois tipos de RNA (*counterpropagation neural network* - CPANN e *radial basis function network* - RBFN). Os resultados obtidos foram melhores quando se utilizou a CPANN, com um erro de classificação de 8,6%, do que quando se utilizou a RBFN, cujo erro de classificação foi de 11%.

Com objetivo de modelagem hidroecológica de bacias de média escala foi desenvolvida por Zhu (2000) com uma abordagem por rede neural para alimentar um modelo de similaridade, construído para representar a paisagem do solo como um contínuo espacial. Neste trabalho, os dados de entrada na rede foram representados por um conjunto de fatores ambientais formativos do solo e os dados de saída (resultados) por um conjunto de valores de similaridade a um conjunto de classes de solos prescritas. A rede foi treinada usando-se um algoritmo de gradiente conjugado em combinação com uma técnica de fortalecimento simulado para aprender as relações entre um conjunto de solos prescritos e os seus fatores ambientais. Esta abordagem foi aplicada no mapeamento de solos de uma bacia na região oeste de Montana (EUA). Os resultados deste estudo mostraram que a informação espacial, derivada do uso da RNA, revelou maiores detalhes e tiveram uma qualidade maior do que aqueles derivados do mapa de solo convencional.

Para integrar variável de diferentes fontes e no intuito de identificar unidades de paisagem e geológicas e automatizar a separação das mesmas, Ribeiro (2003) utilizou RNA. O autor encontrou várias unidades geológicas e de paisagem bem definidas no produto final e concluiu que as RNAs são eficientes para integrar dados de diferentes fontes.

Sirtoli *et al.* (2008), utilizaram uma rede perceptron multicamadas alimentado adiante, com algoritmo de aprendizado de retro-propagação de erro otimizado por *resilient*, para predição das unidades preliminares de mapeamento de solos e, para tanto, foram utilizados como fonte de dados, índices espectrais derivados de imagem de sensor remoto orbital de alta



resolução (Ikonos II), geologia e atributos do terreno, (primários e secundários) derivados de um modelo digital de elevação (MDE). O autor concluiu que RNA possibilita a integração de diferentes variáveis para o processo de delineamento de unidades preliminares em mapas de solos.

#### **2.1.2.4 - Árvores de Decisão**

Amplamente utilizadas em algoritmos de classificação, as árvores de decisão são representações simples do conhecimento e um meio eficiente de construir classificadores que predizem classes baseadas nos valores de atributos de um conjunto de dados.

As árvores de decisão consistem de nodos que representam os atributos; de arcos, provenientes destes nodos e que recebem os valores possíveis para estes atributos; e de nodos folha, que representam as diferentes classes de um conjunto de treinamento (Ingargiola, 1996). Classificação, neste caso, é a construção de uma estrutura de árvore, que pode ser usada para classificar corretamente todos os objetos do conjunto de dados da entrada (Brazdil, 1999).

Muitos são os algoritmos de classificação que constroem árvores de decisão. Não há uma forma de determinar qual é o melhor algoritmo, um pode ter melhor desempenho em determinada situação e outro algoritmo pode ser mais eficiente em outros tipos de situações.

Após a construção de uma árvore de decisão é importante avaliá-la. Esta avaliação é realizada por meio da utilização de dados que não tenham sido usados no treinamento. Esta estratégia permite estimar como a árvore generaliza os dados e se adapta a novas situações, podendo, também, se estimar a proporção de erros e acertos ocorridos na construção da árvore (Brazdil, 1999).

A partir de uma árvore de decisão é possível derivar regras. As regras são escritas considerando o trajeto do nodo raiz até uma folha da árvore. Estes dois métodos são geralmente utilizados em conjunto. Devido ao fato das árvores de decisão tenderem a crescer muito, de acordo com algumas aplicações, elas são muitas vezes substituídas pelas regras. Isto acontece em virtude das regras poderem ser facilmente modularizadas. Uma regra pode ser compreendida sem que haja a necessidade de se referenciar outras regras (Ingargiola, 1996).

Uma árvore de decisão tem a função de particionar recursivamente um conjunto de treinamento, até que cada subconjunto obtido deste particionamento contenha casos de uma única classe. Para atingir esta meta, a técnica de árvores de decisão examina e compara a distribuição de classes durante a construção da árvore. O resultado obtido, após a construção

de uma árvore de decisão, são dados organizados de maneira compacta, que são utilizados para classificar novos casos (Holsheimer & Siebes, 1994; Brazdil, 1999).

Bui *et al.* (1999), aplicaram árvores de decisão com a ferramenta C5.0, para mapeamento digital de solos na região de Toowoomba, Austrália. A partir de um MDE de 250 metros de resolução espacial, os autores obtiveram os parâmetros declividade, aspecto, curvaturas em perfil, em planta e tangencial e área de contribuição. A geologia foi obtida de mapa 1:250.000. Obtiveram coeficiente de incerteza para o mapa predito de 0,48 e concordância entre mapa predito e original de 69 %. O coeficiente Kappa para as classes individuais variou de 0,23 a 0,89, enquanto que o coeficiente kappa geral do mapa foi 0,64.

Criveleni *et al.* (2009) desenvolveram metodologia para mapeamento digital de solos da folha Dois Córregos, com apoio de parâmetros geomorfométricos, geologia e de base de dados oriundos de levantamentos de solos existentes, com uso de árvores de decisão. O maior poder preditivo obtido pela variável geologia deveu-se às características granulométricas contrastantes das formações geológicas locais. Balanceamento de classes para treinamento e pré-poda da árvore pelo número de registros contribuíram para a maior acurácia do modelo (61%).

### **2.1.2.5 - Lógica Fuzzy**

A lógica ou possibilidade *Fuzzy*, criada por Lofti A. Zadeh no início de 1960 está contida na categoria de análises algébricas de mapas não cumulativas ou análises lógicas, junto com a simultaneidade Booleana e a probabilidade Bayesiana. Os produtos gerados por essa categoria de análise são mapas integrados, ao invés de mapas fundidos gerados pela álgebra de mapas cumulativos.

Conforme Katinsky (1994) a lógica *Fuzzy* pode ser definida como a parte da lógica matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado, portanto mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural.

Silva (2003a) referindo-se aos componentes naturais comenta que os limites entre superfícies contínuas não ocorrem bruscamente na grande maioria das vezes. Assim, quando da diferenciação de relevo suave e íngreme, percebe-se uma gradual passagem de uma característica para a outra, por vezes não ocorrendo essa mudança com brusquidão, criando-se áreas ambíguas.

De acordo com Silva (2003a) a Lógica *Fuzzy* fora concebida para estudar as regiões onde se instalam as incertezas, como também em regiões não ambíguas. As ambigüidades

contidas nos componentes deixam de ser colocadas à margem do processo de análise. Os dados são transformados para um espaço de referência e processados por combinação numérica através da Lógica *Fuzzy*, obtendo-se uma superfície de decisão, onde se classifica em áreas mais ou menos adequadas para uma finalidade.

Existem vários tipos de operadores para integração de dados numéricos (booleano, média ponderada, lógica *fuzzy*, Bayes, redes neurais artificiais, dentre outros) que geram resultados (geocampos derivados) com representação numérica. A lógica *fuzzy*, ou lógica nebulosa (*fuzzy logic*), tem por objetivo modelar, de modo aproximado, o raciocínio humano, visando manipular informações em um ambiente de incerteza e imprecisão, fornecendo uma resposta aproximada para uma questão baseada em um conhecimento que é inexato, incompleto ou não totalmente confiável. Os conjuntos *fuzzy* não empregam valores de verdade; expressam valores lingüísticos; usam variáveis lingüísticas; e suportam modos de raciocínio aproximado. Um elemento pode pertencer com um certo grau, denominado grau de pertinência a um determinado conjunto *fuzzy*. O elemento de um conjunto *fuzzy* é representado por  $MFA(z)_i / z_i$ , que denota que o elemento  $z_i$  pertence ao conjunto *fuzzy* com grau  $MFA(z)_i$ .

A função que define conjuntos *fuzzy* pode ser linear, não-linear, normal, gaussiana, ascendente, descendente, sigmóide, entre outras, sendo as mais utilizadas na determinação de valores de membros *fuzzy* as funções lineares e quadráticas (Burrough & McDonnell, 1998).

A integração por meio de modelagem *fuzzy* tem sido extensamente utilizada, pois se baseia no conceito de conjunto nebuloso (*fuzzy sets*), que é uma forma de caracterização de classes, que, por várias razões, não têm, ou não podem definir, limites rígidos (contatos) entre classes (Burrough & McDonnell, 1998). Esse tipo de modelagem é indicado para lidar com ambigüidades, abstrações e ambivalências em modelos matemáticos complexos que representam contatos difusos, comuns em processos naturais.

Carvalho *et al* (2007) apresentaram uma proposta metodológica para delineamento de unidades de mapeamento de solo realizado na região de Mucugê - Bahia, utilizando dados ambientais (MDE, geologia e vegetação), integrados via SIG sob inferência *fuzzy*, visando a confecção de um mapa digital de solo, e verificaram ser possível fazer predição de unidades de solo a partir de dados auxiliares pré-existentes e do conhecimento de especialistas de solos, demonstrando ser uma técnica potencialmente capaz de operacionalizar os trabalhos em levantamentos de solo

### 2.1.2.6 - Pesos de Evidência

Pesos de Evidência é um método quantitativo para combinar evidências em suporte de uma hipótese, pertencente a um grupo de métodos apropriados para a Tomada de Decisão Multicritério (Raines, 1999).

O método foi originalmente desenvolvido para aplicações em diagnósticos médicos, nos quais a evidência consistiu de um conjunto de sintomas e a hipótese foi do tipo "Este paciente tem uma doença X". Para cada sintoma, um par de pesos foi calculado: um para a presença do sintoma e outro para a ausência do sintoma. A magnitude dos pesos dependeu da associação medida entre o sintoma e o padrão da doença em um grande grupo de pacientes. Os pesos poderiam então ser usados para estimar a probabilidade de um novo paciente ter a doença, baseado na presença ou ausência de sintomas.

No final da década de 80, o método de pesos de evidência foi adaptado para mapeamento de potencial mineral com o emprego de sistemas de informações geográficas (Bonham-Carter *et al.*, 1989).

O processo usado na modelagem com pesos de evidência constitui, em sua essência, uma versão quantitativa do método de sobreposição e inspeção de diversos mapas temáticos, com vistas à identificação de áreas onde um determinado fenômeno ou evento possa estar presente (Kemp *et al.*, 1999).

A análise de pesos de evidência é uma técnica que envolve processos de correlação e integração entre mapas, o qual é obtido por formulação matemática de probabilidades e pela combinação dessas evidências em suporte a uma hipótese (Boleneus *et al.*, 2001).

Similar aos métodos estatísticos de regressão múltipla, o modelo de pesos de evidência para combinar evidências, envolve a estimativa da variável resposta a partir de um conjunto de variáveis preditivas.

Os pesos produzem uma medida da associação espacial entre os pontos e o tema evidência. Um peso é calculado para cada classe do tema evidência. Um valor positivo de peso indica que há mais pontos sobre a classe do que ocorreria devido a chance; de forma contrária, um valor negativo indica que muitos poucos pontos ocorrem do que se era o esperado. Um valor de zero ou muito próximo de zero, indica que os pontos de treinamento são aleatoriamente distribuídos com respeito àquela classe. Para mapas binários com somente duas classes (a rotulação da classe por um valor é arbitrária), (W+) é usado para os pesos onde o tema evidência está presente e (W-) é usado para os pesos onde o tema evidência encontra-se ausente. A diferença entre os pesos é conhecida como contraste (C), sendo  $C = (W+) - (W-)$ .

). O contraste é uma medida total da associação espacial entre os pontos de treinamento e o tema evidência, combinando os efeitos dos dois pesos. Algumas vezes ( $W+$ ) pode ser próximo de zero, ainda que ( $W-$ ) seja fortemente negativo. Esta situação sugere que a presença do tema não é particularmente preditiva dos pontos de treinamento, mas a ausência do tema provoca forte evidência de que os pontos são pouco prováveis de ocorrer. Ao invés, pode haver um desequilíbrio entre os valores absolutos de ( $W+$ ) e ( $W-$ ) em outra direção; ou os dois pesos podem ter valores absolutos próximos do mesmo intervalo (Boleneus *et al.*, 2001).

Valendo-se da base matemática que norteia a aplicação da técnica de apoio à tomada de decisão Pesos de Evidência, diversos autores têm apresentado seu emprego nas mais variadas aplicações e integrados ao uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), nas áreas associadas às ciências naturais. Dentre os quais Moreira Silva (1999) utilizou na integração de dados geológicos e geofísicos para seleção de alvos para exploração mineral de ouro no *Greenstone Belt* Rio das Velhas, no quadrilátero ferrífero do Brasil.

Asadi e Hale (2001) utilizou pesos de evidência para a geração de um mapa preditivo de potencial de ocorrência de depósitos de ouro e de mineralizações de metais básicos, no Irã.

Nos Estados Unidos, Hansen (2001) utilizaram o método para estimar a distribuição espacial de sítios arqueológicos em uma porção do Vale Central da Califórnia e Boleneus *et al.* (2001) para a geração de mapas de favorabilidade da ocorrência de depósitos de ouro epitermais, no estado de Washington. Johnstone (2003) também utilizou pesos de evidência no desenvolvimento de um modelo preditivo para a identificação de áreas de alta, média e baixa probabilidade para a localização de sítios arqueológicos históricos e pré-históricos na Geórgia.

Para a modelagem de dados geológicos para aplicação em pesquisa mineral de depósitos radioativos, no Platô de Poços de Caldas (Minas Gerais e São Paulo) Moreira *et al.* (2003), também utilizou o método de pesos de evidência.

## **2.2 - Modelos Digitais de Elevação**

A distribuição dos solos na paisagem, segundo Birkeland (1984), reflete a influência dos vários fatores de formação e está relacionada com combinações entre condições microclimáticas, pedogênese, relevo e processos geológicos superficiais. As formas do relevo, por exercerem influência no fluxo da água, energia e nos processos de redistribuição de material nas vertentes, controlam sobremaneira esta distribuição. Também Gobin *et al.* (2001)

afirmam que o movimento da água nas paisagens é o principal responsável pelo processo de desenvolvimento do solo. Por isso, compreender as formas do relevo permite fazer inferências e predições sobre os atributos do solo em diferentes segmentos de vertentes.

As características do relevo estão diretamente relacionadas com os processos de formação do solo e possuem um grande potencial para serem utilizadas na elaboração de levantamentos de solos (Klingebiel *et al.*, 1987).

Tradicionalmente a identificação de formas de terreno é feita por julgamentos em termos qualitativos baseados nas descrições obtidas na fase de interpretação. Métodos paramétricos são também possíveis e de grande interesse, pois fornecem uma base mais objetiva e uniforme para a identificação de sistemas terrestres.

Estes requerem a medição e o mapeamento de variáveis do relevo como altitude, declividade, curvaturas vertical e horizontal, orientação de vertentes etc., que são combinados para identificar elementos de terreno, que são por sua vez combinados em padrões de terreno. A adoção dos métodos tradicionais de levantamento é justificada pela demora e pelo custo dos métodos paramétricos. No entanto, alternativas como imageamento orbital e geoprocessamento podem reduzir substancialmente estes custos, senão com a mesma qualidade dos métodos tradicionais, ao menos com um grau aceitável de concordância com aqueles (Dent & Young, 1981).

Modelo Digital de Elevação (MDE) é definido por Burrough (1986) como qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço. Existem várias aplicações para os MDE, dentre estas se destacam, o cálculo de volumes, a construção de perfis e seções transversais, a geração de imagens sombreadas ou em níveis de cinza, mapas de declividade e orientação (aspecto), perspectivas tridimensionais, e o cálculo das distâncias em superfície real, que é o foco principal desse trabalho.

Os MDEs podem ser obtidos de diversas formas: aparelhos restituidores como o *Digital Video Plotter* (DVP) que podem extrair dados tri-dimensionais diretamente das fotografias aéreas, imagens de sensores ópticos, imagens de sensores de RADAR como ERS e RADARSAT, altimetria a laser por meio de sensores aerotransportados (LIDAR) e interpolação de informações de cartas topográficas (Valeriano, 2004).

Entretanto, vale ressaltar que existem diferentes métodos de geração de MDE, os quais podem ser construídos, basicamente, por meio de grades regulares retangulares (GRID) ou redes irregulares triangulares (TIN), com a utilização de diferentes algoritmos de interpolação. A escolha do melhor modelo depende diretamente da intenção de uso, do tipo de terreno que se queira representar e da disponibilidade dos dados de entrada. A bibliografia mostra alguns

trabalhos que testam o melhor modelo para a confecção de MDE, entretanto, ainda não há consenso sobre este assunto.

Além da importância direta como informação, a identificação de tipos de relevo permite a particularização de diferentes métodos de tratamento, como propõem Valeriano & Garcia (2000), que recomendam uma estratificação do tratamento de dados dentro da escala de trabalho, em unidades geomorfológicas, microbacias ou vertentes. Em relação ao levantamento de solos, Briggs & Shishira, (1985) sugerem que diferentes intensidades de amostragem devem ser aplicadas a cada atributo e a cada tipo de terreno. Esses estudos realçam a importância da estratificação topográfica como técnica de pré-amostragem, e também para melhorar a resolução espacial de mapeamentos de solo, visando ao manejo.

Diferentes atributos podem ser derivados de um MDE e estes podem ser divididos em atributos primários ou secundários. Os primários são diretamente calculados a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) e inclui variáveis como declividade, orientação das vertentes, elevação, plano e perfil de curvatura, comprimento do caminho do fluxo e área específica de contribuição. Os secundários incluem índice de umidade, índice de transporte de sedimentos e outros (Moore *et al.*, 1993b). Dentre estes atributos a elevação, declividade e orientação, têm sido reconhecidas como as mais efetivas para a realização de levantamentos de solos de média escala (Chagas, 2006).

Para definir unidades básicas para o mapeamento geomorfológico e pedológico Dikau (1989) demonstrou como a análise digital do terreno poderia ser aplicada na quantificação do relevo. Os principais atributos de relevo utilizados para definir estas unidades foram declividade, plano e perfil de curvatura. Esta abordagem fornece uma base sistemática para derivação de complexas unidades de relevo que podem ser utilizadas para auxiliar na estratificação de atributos do solo.

Odeh *et al.* (1991) destacaram a importância do delineamento de unidades de paisagem para a projeção dos padrões de amostragem nos levantamentos de solos, com o objetivo de diminuir o erro por extrapolação e, portanto, a classificação equivocada dos solos. Encontraram que a declividade e a curvatura explicam grande parte da variabilidade dos solos da área estudada. O uso da declividade, da orientação e da elevação nos levantamentos de solos é praticamente generalizado. McBratney *et al.* (2003) usaram a informação topográfica para o zoneamento de uma região com o objetivo de melhorar a representação de atributos do solo mapeados geoestatisticamente.

Classificando formas de relevo (geoformas) em correspondência com os tipos de solos (pedoformas) numa microbacia no município de Viçosa, Ippoliti *et al.* (2005) encontraram

que a declividade e o perfil topográfico foram os principais fatores de relevo que influenciaram na distribuição dos solos na região estudada.

### **2.2.1 - Atributos do relevo derivados do Modelo Digital de Elevação**

As representações do relevo podem ser obtidas a partir de um MDE, que segundo Montgomery (2003), é uma representação espacial da superfície a partir de pontos que descrevem a elevação tridimensional de uma grade de dados a intervalos regulares ou irregulares. Seu processo de elaboração é dividido em três etapas: aquisição dos dados planialtimétricos secundários, geração da grade e derivação dos atributos do relevo.

Os atributos do relevo, obtidos a partir do MDE, utilizados na avaliação da relação com os solos são: elevação, declividade, orientação, plano de curvatura e perfil, radiação solar e índice topográfico de umidade (Moore *et al.*, 1993).

A declividade é definida por Burrough (1986) como sendo um plano tangente a superfície, expresso como a mudança de elevação sobre certa distância, representada no formato digital na resolução de uma grade regular, adotada de 5 m para a área de estudo.

A orientação das vertentes, segundo Chagas (2006), é um atributo primário de relevo pouco explorado no estudo das relações solo paisagem no Brasil, talvez devido à dificuldade de sua obtenção pelo método tradicional da fotointerpretação. Ela está relacionada diretamente com aspectos importantes como evapotranspiração, insolação, teor de água no solo e conseqüentemente com os atributos do solo e potencial agrícola (Moore *et al.*, 1993b).

O plano de curvatura e o perfil de curvatura representam as formas do relevo, sendo importantes atributos na distinção de unidades geomorfológicas. O primeiro se refere à forma da vertente, analisada em perfil, podendo ser convexa, côncava ou retilínea e o segundo à forma da vertente, em plano, podendo ser convergente, divergente ou planar.

O índice topográfico de umidade (ITU) é usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação superficial e conteúdo de água nas paisagens. Sua aplicação é para a separação dos solos com caráter hidromórfico, que ocorrem em relevo plano, de outras classes de solos que ocorrem em área planas e suave onduladas. O ITU é definido como uma função da declividade e da área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo. Em estudo realizado em uma topossequência no Colorado, Moore *et al.* (1993b) verificaram que o ITU e a declividade foram os atributos do relevo que mais se correlacionaram com os atributos medidos no solo.



A radiação solar é fonte primária para processos físicos e biológicos que ocorrem no planeta. Há, pois de acordo com a exposição, se norte ou sul, principalmente, com o declive e época do ano, uma grande variação na energia recebida pelo sistema solo. Segundo Resende *et al.* (2007) a radiação recebida por uma superfície devido aos diferentes declives e exposições e latitudes muito influenciam no pedoclima e por conseqüência nas características do solo. No hemisfério sul as encostas orientadas para o norte são tradicionalmente reconhecidas como superfícies de radiação mais elevada. Neste trabalho, o potencial de radiação solar anual incidente foi calculado adaptando método descrito por McCune e Keon (2002) que fornece a radiação sobre as diferentes encostas. Porém, este apresenta limitações, pois não leva em consideração diferenças regionais dos coeficientes atmosféricos, cobertura de nuvens e sombreamento devido ao relevo.

Atributos topográficos podem ser divididos em primários e secundários ou compostos. Atributos primários podem ser calculados diretamente do (MDE) e incluem variáveis como elevação e declividade. Atributos compostos envolvem combinações de atributos primários e são índices que descrevem ou caracterizam a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem, tais como distribuição do conteúdo de água no solo ou o potencial de erosão laminar (Moore *et al.*, 1991b).

Moore *et al.* (1993b) consideram que os índices topográficos podem ser usados numa variedade de formas. Os índices primários podem ser usados diretamente em processos de modelagem (ex: declividade e aspecto podem ser usados na estimativa da quantidade de energia que atinge uma vertente). Os atributos secundários podem ser utilizados como substitutos de processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos complexos. Por exemplo, o uso do índice de umidade e radiação para prever a distribuição de diferentes espécies de plantas. Estes resultados podem ser correlacionados com os solos na paisagem, pois diferentes solos, em ambiente natural, suportam diferentes espécies vegetais.

Em muitos casos, não é possível fazer medidas diretas desses processos ambientais por motivo de restrição de ordem física, de tempo e econômica. Mapas planialtimétricos são usualmente acessíveis e, mediante métodos de análise do terreno, os atributos topográficos podem ser prontamente calculados sem restrições.

Os atributos topográficos secundários são parâmetros relacionados a processos de transportes de sedimentos e a movimento da água superficial e subsuperficial no solo e, conforme Moore *et al.* (1993b), compreende o índice de umidade, índice de transporte de sedimentos e índice de corrente de máximo fluxo. Em estudo realizado pelos mesmos autores,

o índice de umidade e a declividade foram os atributos do terreno altamente correlacionados com os atributos do solo, medidos numa topossequência no Colorado.

Park & Burt (2002) afirmam que atributos topográficos do terreno são os mais importantes indicadores da variação das propriedades dos solos, por isso o entendimento do solo como um corpo natural, que possui variação tridimensional e que se origina a partir da inter-relação dos fatores de formação e sob a ação dos processos pedogenéticos, favorece a compreensão da geografia dos solos, assim como a predição do comportamento destes.

Para definir unidades básicas para o mapeamento geomorfológico e pedológico Dikau (1989) demonstrou como a análise digital do terreno poderia ser aplicada na quantificação do relevo. Os principais atributos de relevo utilizados para definir estas unidades de relevo foram declividade, plano e perfil de curvatura. Esta abordagem fornece uma base sistemática para derivação de complexas unidades de relevo que podem ser utilizadas para auxiliar na estratificação de atributos do solo.

Ippoliti *et al.* (2005) utilizaram a análise quantitativa da superfície de uma microbacia na Região de "Mar de Morros", visando a identificação e classificação das geformas da paisagem e a sua posterior associação aos diferentes tipos de solos. Foram utilizados atributos primários derivados do MDE (Modelo Digital de Elevação) que permitiram a caracterização de elementos da paisagem (elevação, declividade e curvatura em cada ponto da superfície) que se encontravam relacionados com os processos de formação do solo, segundo técnicas adotadas por Moore *et al.* (1991).

### **2.2.2 - Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM**

O projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) adveio da cooperação entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), do DOD (Departamento de Defesa) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália (Smith & Sandwell, 2003).

A missão usou o mesmo instrumento utilizado em 1994 no programa *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar* (SIR-C/X-SAR), a bordo do ônibus espacial *Endeavour*. Contudo, o arranjo foi projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre por meio de interferometria, em que duas imagens são adquiridas a partir de pontos de vista diferentes, permitindo a determinação da altimetria *pixel a pixel* (Hansen, 2001). O ônibus espacial foi munido de um mastro de 60m, em cuja extremidade foram

instaladas antenas para bandas C e X, e os dispositivos de controle e navegação foram melhorados (Valeriano, 2003).

A missão SRTM trouxe um grande avanço na aquisição de dados topográficos, pois permitiu que dados altimétricos fossem obtidos a partir de um único sobrevôo que imageou 80% da superfície terrestre, compreendendo os paralelos 60° Norte e 56° S, fornecendo modelos tridimensionais com amplitude da grade de 30 metros e processados e disponibilizados gratuitamente para o continente Sul Americano com grade de 90 metros (Smith & Sandwell, 2003)

De acordo com Santos *et al.* (2006) e Smith & Sandwell (2003), a aquisição de dados de forma contínua dentro de uma mesma metodologia garantiu a obtenção homogênea de dados ao longo de todo o globo, tornando o SRTM uma importante ferramenta para os estudos da superfície terrestre. O projeto teve apoio de campo dado, sobretudo por levantamentos geodésicos, no qual foi empregado um método denominado Sistema de Posicionamento Global Cinemático (*Kinematic Global Positioning System*), que favorece uma determinação veloz de linhas de posições dadas por um veículo em movimento. Ao todo, cerca de 70.000km de linhas (transectos) foram coletados para apoio à missão.

Em paralelo à montagem do MDE global, foi feito o processamento de dados de locais específicos, selecionados pela equipe de pesquisadores do programa SRTM. Estes são disponibilizados para a comunidade científica à medida que vão sendo completos. Em janeiro de 2002, a NASA iniciou a distribuição pública destes pequenos conjuntos de dados de locais dentro dos Estados Unidos. Enfim, foram gerados MDE sob resolução de 30m (a rigor, em coordenadas geográficas, como 1 arco segundo, ou 1 $\varnothing$  ou ainda 0,000277o) para os Estados Unidos e planejados sob 90m (a rigor, 3 $\varnothing$  ou 0,000833o) para o resto do mundo (Smith & Sandwell, 2003).

Embora a NIMA aplique diversas operações de pós-tratamento, que incluem remoção de picos e vórtices, informa-se ainda que nenhuma edição foi aplicada sobre os dados e que o conjunto em questão contém um grande número de vãos e outros pontos espúrios, como valores extremamente altos (picos) ou extremamente baixos (vórtices) e os corpos d'água serão geralmente mal definidos, assim como as linhas de costa (Jarvis *et al.*, 2004). Além dessas características descritas, Valeriano (2004) observou também os dados SRTM mostrou uma série de características indesejáveis, além daquelas informadas pelo fornecedor. Observou que as falhas negativas (vórtices) estão representadas por cotas negativas (-8388607m). Técnicas expeditas para contornar este problema, tais como filtragens, não o

eliminam, mas ampliam sua área de influência e modificam indesejavelmente os dados válidos.

Ocasionalmente, foram observadas linhas cujas cotas se encontram abaixo das cotas de linhas vizinhas, formando uma feição artificial que se assemelha a um vale ou sulco retilíneo, com orientação E-W ou N-S. Outra peculiaridade indesejável destes dados é sua sensibilidade a quaisquer objetos presentes sobre a superfície do terreno, tais como antenas, edificações e mesmo variações da cobertura vegetal. Embora tais objetos façam parte da superfície terrestre, sua inclusão no modelo atrapalha a percepção da superfície do terreno em si, como conviria à obtenção de informações de cunho topográfico. Filtragens causam ao usuário a impressão visual de minimizar estes efeitos, porém filtros (média, passa-baixa) não discriminam artefatos de feições reais, suavizando todo o relevo indistintamente (Valeriano, 2004)

Embora os dados SRTM apresentem algumas características indesejáveis para um país como o Brasil, em que grande parte do território nacional é provida de mapeamento em escalas demasiadamente generalizadas, por este aspecto, pode-se considerar o dado SRTM a melhor informação topográfica já disponibilizada para grande parte de nosso território. A resolução de 90m representa um avanço importante em relação à alternativa até então disponível, os dados RADARSAT-1, com resolução quilométrica (Valeriano, 2003).

A utilização de modelos digitais de elevação recai principalmente sobre a obtenção de variáveis derivadas da altimetria (declividade, o exemplo mais frequente). A obtenção destas variáveis é feita principalmente com operações de vizinhança (declividade, orientação e curvatura, por exemplo) e, em alguns casos, funções de conectividade (comprimento de rampa e área de captação, por exemplo), que requerem perceptibilidade das feições de interesse, altamente afetada pela resolução e precisão dos dados. Estudos com dados topográficos cartografados a partir de levantamentos terrestres mostraram a dependência da qualidade dos resultados em relação à resolução espacial do modelo (Valeriano, 2003).

Para solucionar o problema da inexistência de dados foram propostas as seguintes metodologias: fusão de outros modelos de elevação com o do SRTM e interpolação para preencher os buracos (Jarvis *et al.*, 2004; Valeriano, 2003). A minimização dos efeitos de picos e vórtices pode ser obtida pelo emprego de uma série de filtros espaciais. No entanto, deve-se salientar que a filtragem proporciona uma suavização generalizada no relevo, por não distinguir os artefatos (pontes, torres, árvores, entre outros) das feições reais, causando assim uma impressão falsa da topografia (Valeriano, 2003).

Smith & Sandwell (2003) realizaram uma análise espectral cruzada entre os modelos SRTM, NED e ALSM para averiguar a precisão vertical relativa e após definir a precisão vertical utilizaram filtros e realizaram o fracionamento dos dados a fim de obter uma melhor resolução espacial.

Tanto Jarvis *et al.* (2004) quanto Valeriano (2003) optaram por aumentar a resolução espacial com intuito de avaliar a qualidade de detalhamento dos dados SRTM. Valeriano (2003) recomenda que para uma boa delimitação da rede de drenagem, deve-se utilizar a interpolação da carta topográfica como dado primário e os dados do SRTM como complementares.

### **2.2.2.1 - Dados SRTM/Topodata**

O projeto Topodata oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) disponibilizados pelo USGS na rede mundial de computadores (Valeriano, 2008).

Desde que o Topodata foi lançado pela primeira vez, em agosto de 2008, o processamento dos dados foi sucessivamente inspecionado e revisado, com vistas a aprimoramentos e correções.

Os Produtos gerados na iniciativa Topodata, oferece livre acesso a variáveis geomorfométricas locais derivadas de dados SRTM para todo o território nacional.

Estes dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por krigagem. Em seguida, foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Além dessas variáveis, uma derivação de segundo grau foi aplicada para evidenciação de talvegues e divisores de água, cujos resultados foram combinados à orientação de vertentes para favorecer a interpretação das feições de drenagem e caracterização de sua estrutura. As variáveis geomorfométricas foram ainda classificadas para a geração de mapas não-numéricos, tais como as classes de declividade consagradas pela pesquisa agrônômica (classes Embrapa, por exemplo), as curvaturas em convexo/planar/côncavo, bem como possíveis formas de vertentes, entre outras representações qualitativas (Valeriano, 2008).

### 2.3 - Sistemas de Informações Geográficas

Com o advento da informática, o uso de geotecnologias (SIG - Sistema de Informações Geográficas e PDI ó Processamento Digital de Imagens) vem apontando novos caminhos e modelos que possibilitam o tratamento de grande quantidade de dados e informações indispensáveis aos mapeamentos realizados em Ciência do Solo.

Os Sistemas Informações Geográficas (SIGs) são usualmente aceitos como sendo uma tecnologia que possui a ferramenta necessária para realizar análises com dados espaciais e, portanto, ao ser implementado, oferece alternativas para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico (Silva, A. 2003).

Os SIGs são, na realidade, uma tecnologia do mundo contemporâneo, tendo como característica principal a capacidade de integrar e transformar dados espaciais (Silva, A. 2003).

São constituídos por um grupo de ferramentas específicas para coleta, tratamento, recuperação, visualização, armazenamento e análise de informações georreferenciadas visando obter novas informações nas mais diversas áreas do conhecimento científico (Câmara e Davis, 2002).

De acordo com Silva (2003), os SIGs são uma tecnologia que possui um ferramental necessário para realizar análises com dados espaciais e oferece alternativas para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico

A tecnologia dos SIGs traz vantagens devido à sua capacidade de manipular a informação espacial de forma precisa, rápida e sofisticada. Atualmente, vem sendo utilizada por diversos profissionais, para as mais variadas aplicações, tornando-se ferramenta de uso comum em empresas, universidades e agências governamentais (Rocha, 2000).

Moreira (2003) relata que um SIG é composto por cinco componentes independentes, porém interligados. Os componentes do SIG são as interfaces, entrada e integração dos dados, funções de consulta e análise espacial, visualização e plotagem, e banco de dados geográficos.

O principal aspecto dos dados tratados em um SIG é a natureza dual da informação, ou seja, um dado espacial ou dado geográfico e possui uma localização expressa em coordenadas e atributos descritivos representados num banco de dados.

Um SIG comporta dois tipos de dados, matriciais e vetoriais. Na representação matricial, supõe-se que o espaço possa ser tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma porção do terreno. Na representação vetorial, a localização e a

aparência gráfica de cada objeto são representadas por um conjunto definido de pares de coordenadas.

Existem diversos trabalhos utilizando a tecnologia dos SIGs, para a caracterização dos recursos naturais, podendo-se citar: Andrade *et al.* (1998), Lacerda (1999), entre tantos outros, que aplicaram modelos preditivos de solos na paisagem, permitindo o mapeamento dos solos das regiões estudadas.

Silva (2003b) utilizou a geotecnologia no levantamento dos solos e adequação do uso das terras na bacia do rio João Leite em Goiânia-GO. O trabalho teve como objetivo a aplicação de SIG (SPRING) na distinção de classes de solos, por meio de modelagem geomorfo-geo-pedológica e na adequação do uso das terras, com a utilização de cartas planialtimétricas, imagens de satélite Landsat 7 e mapa geológico.

Lacerda *et al.* (2005) estudaram as relações entre solos, geomorfologia, geologia e vegetação nativa do DF, com objetivo de realizar o detalhamento e maior hierarquização das classes de solos do mapa pedológico do Distrito Federal disponível (Embrapa, 1978). Foi elaborado o mapa de solos de uma área-piloto do DF, em escala 1:25.000, por intermédio de técnicas de geoprocessamento, envolvendo classes de relevo (declividade) e geologia.

Bernardes (2006) realizou um diagnóstico do meio físico do Complexo Serra Negra, MG, incluindo o mapeamento dos solos, o estudo da evolução da ocupação das terras, o zoneamento ambiental da área em unidades de paisagem e a definição de áreas destinadas à preservação, com o auxílio de geotecnologia.

## **2.4 - Relações Solo, Geologia e Paisagem**

A paisagem é o resultado material de todos os processos que ocorrem em um determinado local. A paisagem é, portanto construída a partir da síntese de todos os elementos presentes neste local e sua apreensão se dá pela imagem resultante dela. Assim, atua como um sistema complexo e dinâmico, onde diferentes fatores naturais e culturais interagem e evoluem em conjunto (Santos, 2002).

A distribuição dos solos na paisagem, segundo Birkeland (1984), reflete a influência dos vários fatores de formação e está relacionada com combinações entre condições microclimáticas, pedogênese, relevo e processos geológicos superficiais. As formas do relevo, por exercerem influência no fluxo da água, energia e nos processos de redistribuição de material nas vertentes, que controlam sobremaneira esta distribuição. Também Gobin *et al.* (2001) afirmam que o movimento da água nas paisagens é o principal responsável pelo

processo de desenvolvimento do solo. Por isso, compreender as formas do relevo permite fazer inferências e predições sobre os atributos do solo em diferentes segmentos de vertentes.

As características do relevo estão diretamente relacionadas com os processos de formação do solo e possuem um grande potencial para serem utilizadas na elaboração de levantamentos de solos (Klingebiel *et al.*, 1987).

Além da importância direta como informação, a identificação de tipos de relevo permite a particularização de diferentes métodos de tratamento, como propõem Valeriano & Garcia (2000), que recomendam uma estratificação do tratamento de dados dentro da escala de trabalho, em unidades geomorfológicas, microbacias ou vertentes. Em relação ao levantamento de solos, Briggs & Shishira (1985) sugerem que diferentes intensidades de amostragem devem ser aplicadas a cada atributo e a cada tipo de terreno. Esses estudos realçam a importância da estratificação topográfica como técnica de pré-amostragem, e também para melhorar a resolução espacial de mapeamentos de solo, visando ao manejo.

Odeh *et al.* (1991) destacaram a importância do delineamento de unidades de paisagem para a projeção dos padrões de amostragem nos levantamentos de solos, com o objetivo de diminuir o erro por extrapolação e, portanto, a classificação equivocada dos solos. Encontraram que a declividade e a curvatura explicam grande parte da variabilidade dos solos da área estudada. O uso da declividade, da orientação e da elevação nos levantamentos de solos é praticamente generalizado. McBratney *et al.* (2003) usaram a informação topográfica para o zoneamento de uma região com o objetivo de melhorar a representação de atributos do solo mapeados geoestatisticamente.

Classificando formas de relevo (geoformas) em correspondência com os tipos de solos (pedoformas) numa microbacia no município de Viçosa, Ippoliti *et al.* (2005) encontraram que a declividade e o perfil topográfico foram os principais fatores de relevo que influenciaram na distribuição dos solos na região estudada.

Park & Burt (2002) afirmam que atributos topográficos do terreno são os mais importantes indicadores da variação das propriedades dos solos, por isso o entendimento do solo como um corpo natural, que possui variação tridimensional e que se origina a partir da inter-relação dos fatores de formação e sob a ação dos processos pedogenéticos, favorece a compreensão da geografia dos solos, assim como a predição do comportamento destes (Bockheim *et al.*, 2005). Comentam ainda que, os solos de uma encosta variam em resposta ao movimento de água e ao transporte superficial de sedimentos, processos estes que são controlados pelas formas da superfície das vertentes.



A heterogeneidade do solo e a da comunidade vegetal são percebidas e quantificadas de maneiras distintas. Em levantamentos de solos, comumente são feitas observações pontuais, distribuídas ao longo de diferentes unidades do relevo. Para o mapeamento da vegetação, a obtenção de dados contínuos é mais acessível, principalmente por meio de sensores remotos, como fotografias aéreas e imagens de satélite (Ruggiero *et al.* 2006).

A relação entre vegetação nativa e classes de solos pode ser utilizada na elaboração de mapeamentos pedológicos, visto que tal relação constitui reflexo das características físicas, químicas e mineralógicas das classes de solos, que definem o potencial e capacidade de uso dos mesmos (Lacerda, 2007).

Estudando relações entre as coberturas florestais e variáveis geomorfológicas, em ambientes topográficos distintos, Florinsky & Kuryakova (1996) concluíram que as propriedades da vegetação são dependentes dos parâmetros do relevo, os quais controlam a migração e acumulação de água na paisagem pela gravidade. Esses parâmetros são a curvatura da superfície, área de contribuição, índice de umidade e corrente de máximo fluxo. Observaram também que, dentre as variáveis geomorfológicas, a elevação se relacionou diretamente com a distribuição altitudinal de solos e, por conseguinte, de vegetação, pois as propriedades dos solos são dependentes das variáveis topográficas e transferem sua dependência para a vegetação que o recobre.

Estudando as relações solo-geomorfologia em áreas de transição de arenito-basalto e, relacionando a variabilidade espacial dos atributos do solo com os compartimentos de relevo, Cunha *et al.* (2005) concluíram que as variações dos solos na transeção estudada mostraram-se, em grande parte, relacionada com a idade da superfície, com o material de origem e com a inclinação do terreno.

Estudos interdisciplinares foram desenvolvidos por Oliveira *et al.* (2005) envolvendo geologia, geomorfologia e pedologia, na avaliação e elaboração de modelos preditivos da distribuição das classes de solos na paisagem

Lacerda *et al.* (2008) estudou as relações entre material de origem (relação pedogeológica), classes de relevo (relação pedogeomorfológica) e solos com horizontes B textural e B nítico, a fim de se propor um modelo preditivo da distribuição desses solos na paisagem da região de Lavras (MG).

Lacerda *et al.* (2006), em estudos da distribuição de solos na Estação Ecológica de Águas Emendadas ó DF, propuseram relações entre os solos e as formas da paisagem ou geoformas, largamente utilizadas como base de levantamento pedológico, denominadas de

pedoformas. Os dados utilizados foram a hipsometria, a declividade, os tipos de solos e o substrato geológico os quais contribuíram para a definição pedoformas.

Com base no conhecimento dos padrões regionais de solos, pode-se citar a possibilidade de utilizar informações previamente geradas em pequenas áreas representativas, conhecidas como áreas de referência, o que permite a previsão de ocorrência de tipos de solos em outras áreas não mapeadas, por correlação com os padrões conhecidos (Lagacherie & Voltz, 2000).

## CAPÍTULO 3 - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO CARTA E SRTM/TOPODATA, PARA ESTUDOS DE MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS\*

### 3.1 - Resumo

Na última década, os modelos quantitativos para mapeamento digital de solos têm experimentado rápido desenvolvimento de novos métodos, mais eficientes e econômicos. Um dos motivos é devido, principalmente, ao aumento de auxiliares de informações do ambiente físico, especialmente as imagens de sensoriamento remoto e atributos do terreno derivados de modelos digitais de elevação. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade dos modelos digitais de elevação obtido por meio de curvas de nível e SRTM / Topodata reamostrado para 30 metros, para o mapeamento digital do solo. Ambos os modelos digitais de elevação foram avaliados para a qualidade vertical e potencial para derivar atributos do terreno, que capturam os processos geomórficos principais e hidrologia que ocorrem na área. Para permitir a comparação, os modelos digitais de elevação foram gerados com uma resolução espacial de 30 metros. O modelo digital de elevação obtido a partir de curvas de nível apresentou qualidade superior.

**Palavras-chave:** modelos digitais de elevação, geoprocessamento

\*Artigo aceito para publicação no periódico: *Journal of Soil Science e Environmental Management* (Original em inglês)

### **3.2 - Abstract**

*In the last decade, the quantitative models for digital mapping of soils have experienced rapidly development of new methods, more efficient and economic. One reason is due, mainly, to the increase of auxiliary information of physical environment, especially the images from remote sensing and terrain attributes derived from digital elevation models. Thus, this study aimed to evaluate the quality of digital elevation models obtained by contour lines and from SRTM/Topodata resample to 30 meters, for digital soil mapping. Both digital elevation models were assessed for vertical quality and the potential to derive terrain attributes, that capture the main geomorphic processes and hydrology that occur in the area. To enable comparison, all digital elevation models were generated with a 30 meters spatial resolution. The digital elevation model obtained from contours lines presented superior quality.*

**Key words:** *digital elevation models, geoprocessing*

### 3.3 - Introdução

A distribuição dos solos na paisagem, segundo Birkeland (1984), reflete a influência dos vários fatores de formação e está relacionada com combinações entre condições microclimáticas, pedogênese, relevo e processos geológicos superficiais. As formas do relevo, por exercerem influência no fluxo da água, energia e nos processos de redistribuição de material nas vertentes, controlam sobremaneira esta distribuição. Também Gobin *et al.* (2001) afirmam que o movimento da água nas paisagens é o principal responsável pelo processo de desenvolvimento do solo. Por isso, compreender as formas do relevo permite fazer inferências e previsões sobre os atributos do solo em diferentes segmentos de vertentes.

Na última década, a modelagem quantitativa no mapeamento digital dos solos tem experimentado um rápido desenvolvimento de novos métodos e mais econômicos, devido, principalmente à crescente disponibilidade de informações auxiliares do meio físico, principalmente as imagens provenientes de sensoriamento remoto e os atributos de elevação, derivados de modelos digitais de elevação (MDE) (Dobos *et al.*, 2000, McBratney *et al.* 2003, McBratney *et al.*, 2000, Hengl, 2003).

O uso de modelos digitais de elevação na compreensão e identificação da distribuição dos solos, formulados com base em MDEs, contribui como importante ferramenta para delimitar unidades preliminares de mapeamento dos solos, utilizadas no suporte aos trabalhos de levantamentos de solos na fase de campo e apoio à cartografia pedológica (Nanni & Rocha, 1997 e Hengl, 2003).

A modelagem digital do relevo é uma das técnicas quantitativas melhor desenvolvidas para prever atributos e classes de solos (McKenzie & Ryan, 1999). Diferentes atributos podem ser derivados de um MDE (Wilson & Gallant, 2000) e dentre estes atributos a elevação, a declividade e a orientação, têm sido reconhecidos como os mais efetivos para a realização de levantamentos de solos de média escala (Chagas, 2006, Campling *et al.*, 2002. Debella-Gilo *et al.*, 2007, Bailey *et al.* 2003, Figueiredo, 2006). Embora Odeh *et al.* (1991), verificaram que a declividade e a curvatura explicam grande parte da variabilidade dos solos.

Os MDEs podem ser obtidos de diversas formas: aparelhos restituidores como o *Digital Video Plotter* (DVP) que podem extrair dados tri-dimensionais diretamente das fotografias aéreas, imagens de sensores ópticos, imagens de sensores de radar como ERS e RADARSAT, altimetria a laser por meio de sensores aerotransportados (LIDAR) e interpolação de informações de cartas topográficas (Valeriano, 2003).

O projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) forneceu modelos tridimensionais com qualidade e com duas resoluções espaciais, de 1 arc sec (30 metros) e de 3 arc sec (90 metros), com datum horizontal WGS84 e datum vertical WGS84/EGM96, com acuidade vertical relativa na ordem de 5 metros (Smith & Sandwell, 2003).

Produtos gerados na iniciativa Topodata, oferece livre acesso a variáveis geomorfométricas locais derivadas de dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) para todo o território nacional. Estes dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por krigagem. Em seguida, foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical (Valeriano, 2008).

No Brasil, os modelos de elevação digital (DEM) são normalmente produzidos pelos próprios usuários e pouca atenção tem sido dada às suas limitações como fonte de informação espacial e, portanto este trabalho teve como objetivo analisar a qualidade dos modelos digitais de elevação obtido por meio de carta e por meio do SRTM/Topodata, tendo-se em vista auxiliar na escolha de um modelo apropriado para derivar atributos topográficos a serem utilizados em um mapeamento de solo digital.

### **3.4 - Material e Métodos**

#### **Caracterização da área**

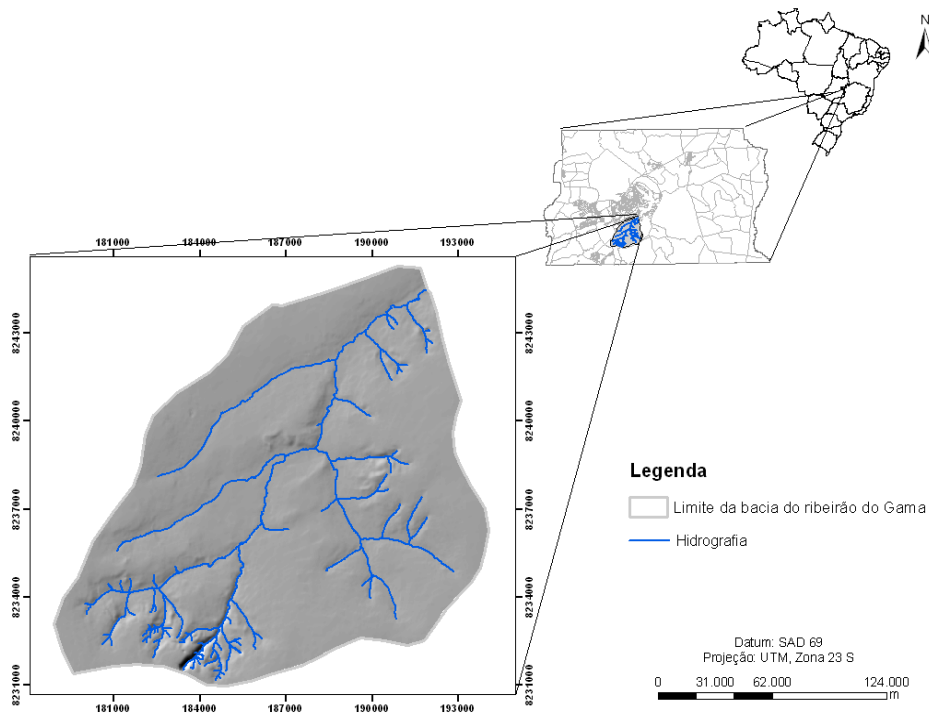
A bacia do ribeirão do Gama possui uma área de 141,20 km<sup>2</sup>, localizada entre as coordenadas UTM, fuso 23S, 191664 m e 179621m sul e 8245203m e 8231473 m oeste, inserida no Bioma Cerrado (Figura 1).

O clima predominante na região de estudo, segundo a classificação de Köppen, enquadra-se entre *õtropical de savanaö* e *õtemperado chuvoso de inverno secoö*, com concentração da precipitação pluviométrica no verão (Martins, 1998).

A geologia da bacia do ribeirão do Gama compreende o Grupo Paranoá, de idade Meso/Neoproterozóico (1.300 a 1.100 milhões de anos), sendo caracterizado por Ardósias e Metarritmitos Arenosos (Freitas-Silva & Campos, 1998).

A geomorfologia da região do Distrito Federal vem sendo objeto de estudo há vários anos e existe um relevante acervo de estudos tais como Codeplan (1984), Novaes Pinto (1986, 1987 e 1994a, 1994b), Novaes Pinto & Carneiro (1984) e Martins & Baptista (1998). Na bacia em estudo, de acordo com Codeplan (1984) a compartimentação geomorfológica

proposta separa dois pediplanos, superfícies residuais de aplainamento nas cotas mais elevadas, depressões interplanálticas e planícies.



**Figura 1.** Mapa de localização da bacia do ribeirão do Gama.

A principal fonte de informações pedológicas, para Distrito Federal (DF), é o levantamento de reconhecimento de solos realizado pela Embrapa (1978), com elaboração de mapa pedológico em escala 1:100.000. Na bacia do ribeirão do Gama apresenta principalmente as seguintes classes de solos o Latossolo Vermelho, o Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo, Solos Hidromórficos Indiscriminados e Plintossolos.

### **Avaliação dos modelos digitais de elevação**

Neste estudo foi utilizado um MDE gerado a partir de curvas de nível e um MDE gerado a partir de dados SRTM para todo o território nacional, iniciativa Topodata (Valeriano, 2008) que oferece livre acesso a variáveis geomorfométricas locais. Estes dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por meio do processo de interpolação krigagem (Landim, 2003) e foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica (Shary & Sharaya, 2002) sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis: declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical, os quais foram utilizados nesse estudo.

Ambos os MDEs foram avaliados com relação à qualidade vertical que apresentam e ao potencial para se derivarem atributos do terreno que reflitam os principais processos

geomórficos, climáticos e hidrológicos que ocorrem na área estudada. Para possibilitar a comparação, todos os MDEs foram gerados com uma resolução espacial de 30 m.

O MDE obtido a partir de curvas de nível foi elaborado utilizando-se os dados relativos às curvas de nível, com equidistância vertical de 10 m, hidrografia e pontos cotados contidos nas cartas topográficas.

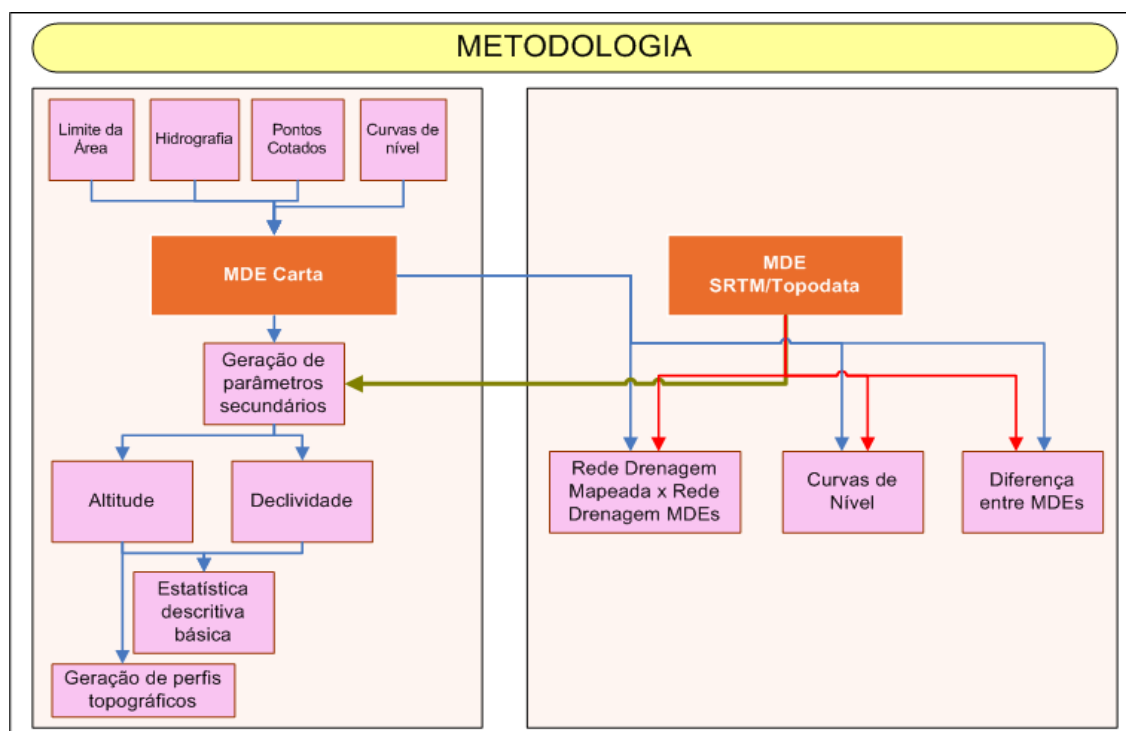
No presente estudo foi utilizado o método baseado no ajustamento da superfície, por meio do módulo *Topo to Raster*® do programa ArcGis 9.2®.

Os MDEs foram avaliados quantitativa e qualitativamente. Comparações entre os MDEs gerados por carta e obtidos por meio da reamostragem dos dados SRTM/Topodata, foram realizadas por meio da análise dos perfis de elevação.

Além disso, conforme sugerido por Wise (2000) e Hutchinson & Gallant (2000) foi realizado a comparação visual entre a drenagem mapeada e a drenagem derivada pelos diferentes MDEs e a também a comparação entre as curvas de nível derivadas e as curvas de nível originais.

Por meio de tentativa e erro foi obtido o valor de escoamento acumulado necessário para gerar a rede de drenagem numérica com aproximadamente o mesmo nível de detalhe da rede de drenagem mapeada.

O fluxograma da metodologia utilizada no estudo está apresentado na Figura 2.



**Figura 2.** Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.



### 3.5 - Resultados e Discussão

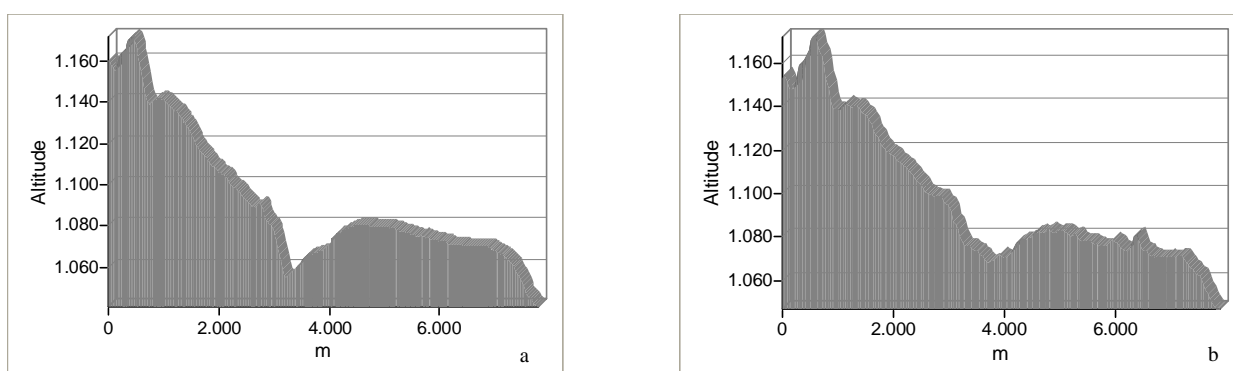
A especificação correta de parâmetros primários tais como declividade, aspecto, e direção de drenagem, é fundamental para a modelagem precisa da distribuição de solos numa paisagem. Muitas propriedades pedológicas estão ligados fundamentalmente com parâmetros do terreno (Moore *et al.*, 1991), a qualidade dos dados do terreno, o tamanho da célula (resolução), e o algoritmo utilizado para obter os derivados terreno.

Os resultados da Tabela 1 mostraram muita semelhança entre os valores produzidos pelo MDE obtido por meio de carta e o MDE SRTM/Topodata. Chagas *et al.* (2010) também observaram valores semelhantes.

**Tabela 1.** Resultados estatísticos para os MDEs estudados.

MDE	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Altitude carta	1002,22	1248,12	1097,25	48,23
Altitude srtm	1003,00	1248,00	1099,70	47,33
Declividade carta	0,01	31,97	5,18	5,64
Declividade srtm	0,00	43,00	5,54	4,08

Na Figura 3 estão os perfis de elevação dos MDEs avaliados. No MDE SRTM/Topodata, próximo ao curso de água, percebe-se que não há o detalhamento do vale, provavelmente pelo tipo de sensor que registra as copas das árvores, que nessas áreas são de grande porte.



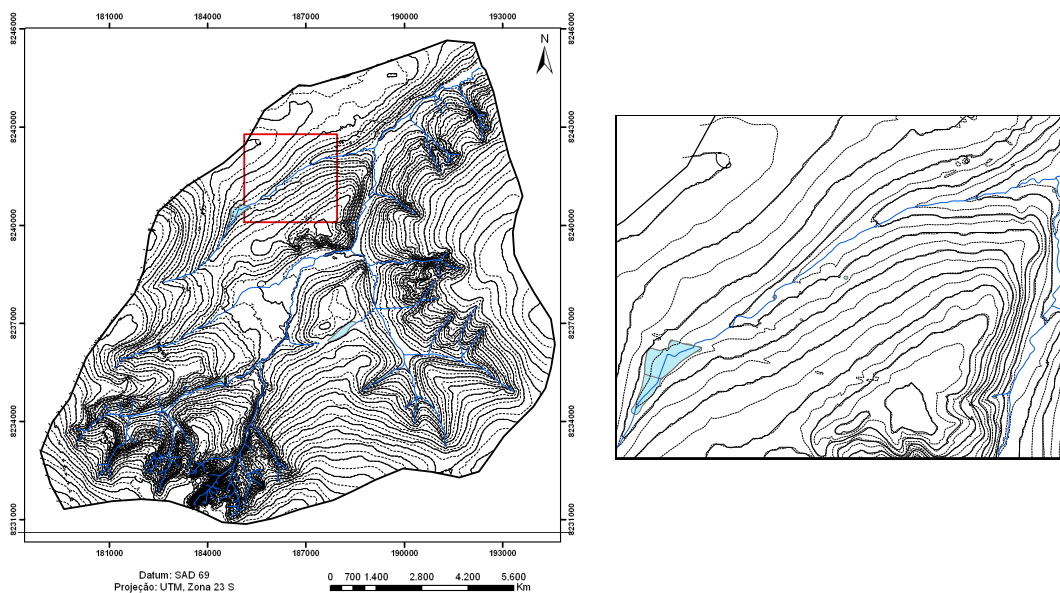
**Figura 3.** Perfil da altitude do modelo digital de elevação gerado a partir de carta (a) e modelo digital SRTM/Topodata (b) na bacia do ribeirão do Gama.

Na criação de um MDE se busca a obtenção de um modelo que contenha detalhes topográficos, preservando sempre as características do terreno e assim, as curvas de nível

derivadas generalizaram os dados em quantidades variadas. Nesse estudo, a melhor concordância com as curvas de nível digitalizadas foi obtida pelo MDE Carta, conforme observado na Figura 4. Os picos foram mantidos e somente pequenas variações são notadas com relação às linhas originais, podendo o MDE Carta ser considerado, portanto, de qualidade superior, para este critério.

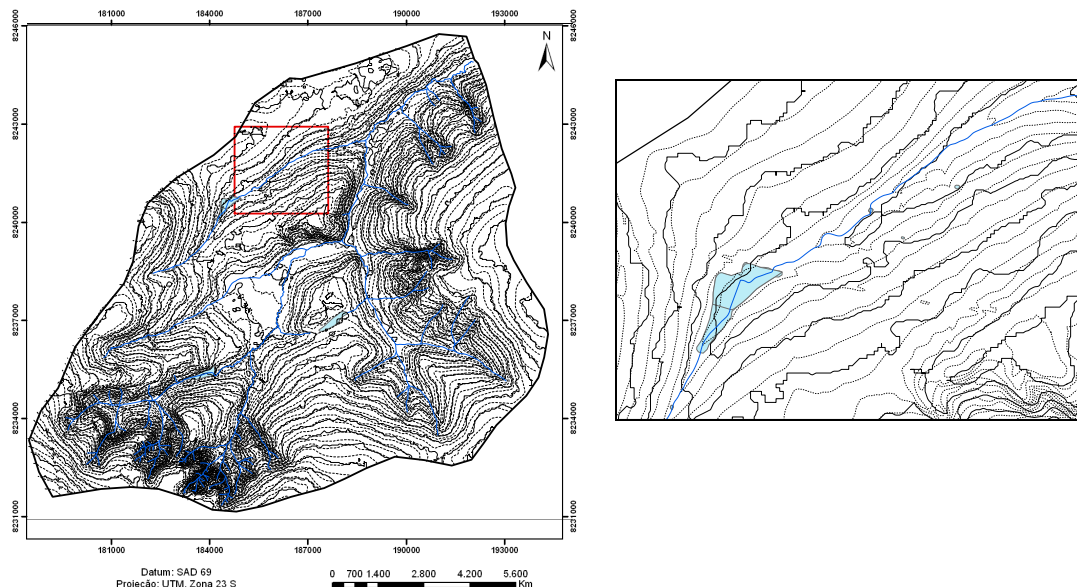
Resultados de estudos realizados por Kocak *et al.* (2004) e Gerstenecker *et al.* (2005), mostraram que a exatidão de MDEs derivados de sensores remotos é muito dependente da inclinação do terreno, sendo a qualidade mais baixa em áreas declivosas que em áreas planas, razão por que Falorni *et al.* (2005) sugerem que, em terrenos muito elevados e íngremes, a exatidão especificada de 16 m para MDEs do SRTM deva ser considerada apenas como diretriz.

De acordo com Dikau (1989), para definir unidades básicas para o mapeamento geomorfológico e pedológico a análise digital do terreno pode ser aplicada na quantificação do relevo. Os principais atributos de relevo utilizados para definir estas unidades de relevo foram declividade, plano e perfil de curvatura. Esta abordagem fornece uma base sistemática para derivação de complexas unidades de relevo que podem ser utilizadas para auxiliar na estratificação de atributos do solo.



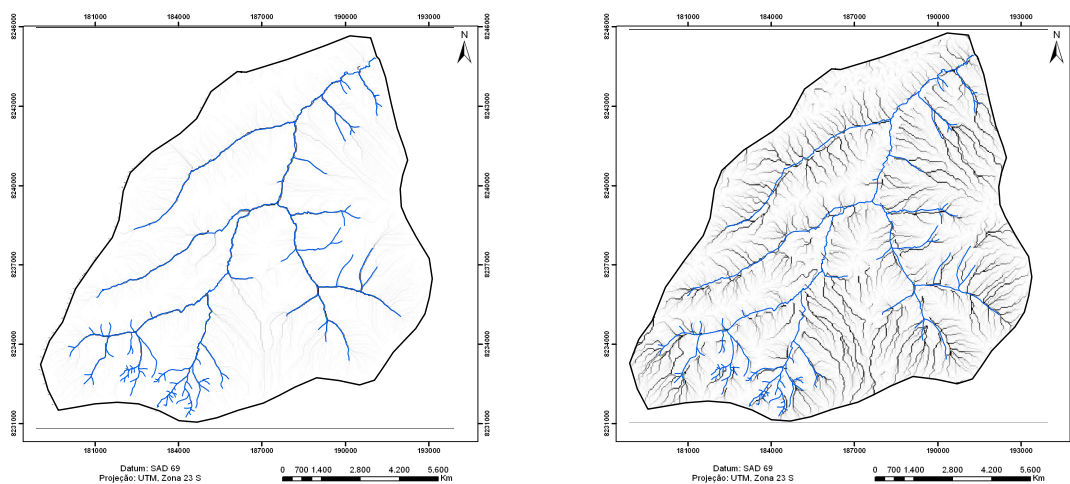
**Figura 4.** Curvas de nível restauradas a partir do MDE gerado por meio de carta.

O MDE SRTM/Topodata mostrou pouca concordância com as curvas de nível originais das cartas (Figura 5); entretanto não foram verificadas curvas de nível que se cruzam.



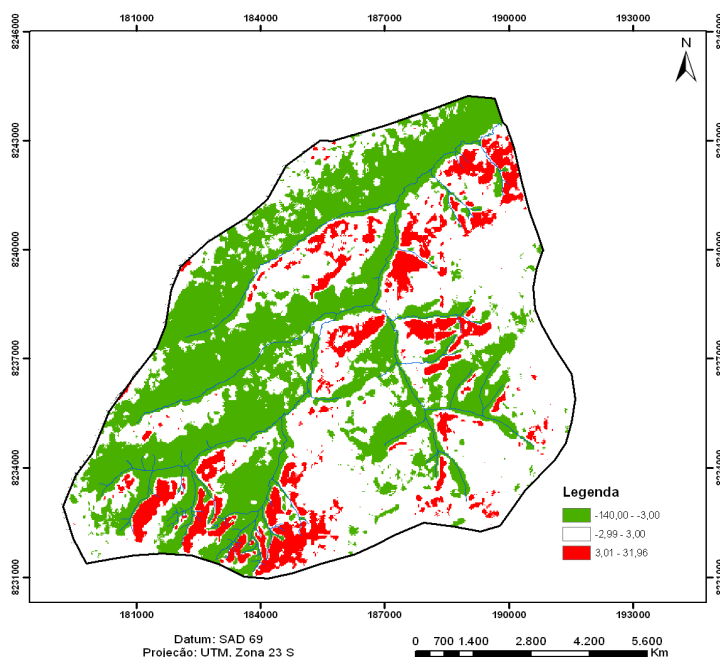
**Figura 5.** Curvas de nível restauradas a partir do MDE SRTM/Topodata.

A rede de drenagem derivada dos MDE SRTM/Topodata mostrou baixa concordância com a drenagem mapeada evidenciando, nesses casos, a presença de erros na fonte de dados utilizada (Figura 6).



**Figura 6.** Direção de fluxo gerado a partir do MDE/Carta e SRTM/Topodata.

De acordo com a Figura 7 observa-se que o MDE SRTM/ Topodata superestimou a altitude na área urbanizada da bacia do ribeirão do Gama. Nas áreas com a vegetação nativa preservada essa diferença foi em torno de 3 metros para mais ou para menos.



**Figura 7.** Subtração da altitude MDE gerado por carta e MDE SRTM/Topodata.

Jarvis *et al.* (2004), observaram tendência semelhante nos dados de elevação influenciada pela orientação da encosta, ao avaliarem um MDE do SRTM para Honduras porém, neste estudo, as diferenças positivas em relação ao MDE oriundo de cartas topográficas, estavam presentes nas encostas norte, nordeste ou leste, enquanto as negativas foram observadas nas encostas sul, sudeste ou oeste; esses resultados, segundo os autores, foram atribuídos ao efeito do ângulo de visada.

### 3.6 - Conclusões

Após análise da qualidade dos MDEs verificou-se que o MDE gerado por meio de carta apresentou qualidade superior comparado com o MDE SRMT/Topodata, indicando ser o mais adequado para uso na área de estudo.

Devido à extensão do território brasileiro sob carência de mapeamentos de solos, devem-se considerar as facilidades atuais da disponibilidade dos modelos digitais de elevação como o SRTM/Topodata, que atualmente é de livre acesso e cobre todo o território nacional, o que pode auxiliar em mapeamentos de solos em outras regiões do Brasil.

## **CAPÍTULO 4 - MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS UTILIZANDO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA, NA BACIA DO RIBEIRÃO DO GAMA, DISTRITO FEDERAL**

### **4.1 - Resumo**

O uso de modelagem quantitativa no mapeamento digital dos solos tem se desenvolvido com o surgimento de novos métodos mais eficientes e econômicos. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo digital de elevação obtido por meio de carta topográfica e provenientes do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) reamostrado para 30m (Topodata) e o uso da regressão linear múltipla no mapeamento digital dos solos na bacia do ribeirão do Gama, Distrito Federal. Os estudos foram divididos em três etapas: compilação dos perfis de solos já descritos na área de estudo; análise dos modelos digitais de elevação e seus parâmetros derivados (altitude, declividade, aspecto, curvatura total, e acumulação de fluxo) e os mapas geomorfológico e geológico; e por último a análise de regressão linear múltipla para a geração do mapa de solos. Verificou-se que apenas a declividade e a geomorfologia foram estatisticamente significantes para o modelo digital de elevação gerado por meio de carta e nenhuma das variáveis do modelo digital de elevação Topodata foi significativa. Verificou-se que a metodologia utilizada permitiu mapear os solos em áreas não amostradas e possibilitou o mapeamento de solos em áreas já urbanizadas.

**Palavras-chave:** modelos digitais de elevação, geoprocessamento

## **4.2 - Abstract**

*The use of quantitative modeling in digital soil mapping has been developed with the emergence of more efficient and economical methods. In this sense, this study aimed to evaluate the applicability of digital elevation model obtained from topographic maps and from Shuttle Radar Topography Mission resampled to 30m using multiple linear regression in digital soil mapping in the Gama basin, Distrito Federal. The study were divided into three steps: collection of soil profiles already described in the study area, in separately, analysis of the digital elevation models and their derived parameters (height, slope, aspect, total curvature and flow accumulation) and the geomorphological and geological maps, and finally multiple linear regression analysis for generating the soil map. Only geomorphology and slope were statistically significant for the digital elevation model generated by topographic maps and none of the variables digital elevation model Topodata was significant. The methodology allowed soil mapping in areas not sampled and allowed the soil mapping in urbanized areas.*

**Key-words:** *digital elevation model, geoprocessing*

### 4.3 - Introdução

A produção tradicional dos mapas de solos é um processo demorado, com custo alto o que conseqüentemente não permite a rápida atualização, de forma mais acurada e com diminuição dos custos dos levantamentos de solos (Zhu *et al.*, 2001, McBratney *et al.*, 2003). Neste contexto, novas abordagens baseadas em modelagem quantitativa e no emprego dos Sistemas Informações Geográficas (SIGs), têm sido empregadas, (Rossiter, 2004) com o objetivo de descrever, classificar e definir os padrões de variação espacial dos solos na paisagem, de forma a melhorar o conhecimento da variabilidade espacial dos solos, da acurácia e da qualidade da informação (Webster, 1984, McBratney *et al.*, 2000, Hengl, 2003, Dobos *et al.*, 2000).

Na última década, a modelagem quantitativa no mapeamento digital dos solos teve um rápido desenvolvimento, com a aplicação de novos métodos mais eficientes e econômicos, devido, à crescente disponibilidade de informações auxiliares do meio físico, como as imagens provenientes de sensoriamento remoto e os atributos do relevo, derivados de modelos digitais de terreno (MDEs) (Dobos *et al.*, 2000, McBratney *et al.*, 2003), bem como a melhoria das condições computacionais de baixo custo.

Neste contexto, os SIGs e as geotecnologias têm um papel fundamental no mapeamento de solos, devido à agilidade do processamento das informações e ao grande volume de dados que estas ferramentas podem proporcionar (Zhu *et al.*, 2001).

De acordo com McKenzie & Ryan (1999) a modelagem digital do relevo é uma das técnicas quantitativas mais apropriadas para prever atributos e classes de solos. Destaca-se ainda que diferentes atributos podem ser derivados de um MDE (Wilson & Gallant, 2000) e dentre estes atributos a altitude, a declividade e a orientação, têm sido reconhecidos como os mais efetivos para a realização de levantamentos de solos (Chagas, 2006; Campling *et al.*, 2002; Debella-Gilo *et al.*, 2007; Bailey *et al.*, 2003 & Figueiredo, 2006).

Os MDEs podem ser provenientes da interpolação de dados obtidos por meio de cartas topográficas ou de sensores remotos, como o elaborado por meio da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Diversos estudos vêm sendo realizados objetivando a análise, comparação e atualização de informações da superfície terrestre, por meio de dados do SRTM. Assim, podem-se citar os trabalhos desenvolvidos por Santos *et al.* (2006), Fredrick *et al.* (2007), Luedeling *et al.* (2007), Berry *et al.* (2007) e Valeriano & Abdon (2007).

Para estudar as relações entre atributos do terreno e solos pesquisadores têm utilizado diferentes métodos estatísticos, como regressão linear múltipla, análise de correlação,

regressão stepwise, bem como diversos outros métodos (Ziadat, 2005). De acordo com Chaplot *et al.*, 2001; Dobos *et al.*, 2000; Gessler *et al.*, 2000; Gobin *et al.*, 2001; Moore *et al.*, 1993b, geralmente, a regressão linear é recomendada porque a generalização possibilita a predição em escala regional, relações mais compreensíveis possibilitando também, a estimativa dos erros.

Carré & Girard (2002), utilizaram regressão linear múltipla para o mapeamento de tipos de solos e atributos da forma do terreno e cobertura da terra, e verificaram que as regras entre solo-ambiente foram explicitadas pelas equações de regressão, o que foi considerado um avanço, pois na metodologia tradicional, usualmente, não apresenta informação quantitativa. Moore *et al.* (1993), utilizou regressão linear múltipla como uma primeira aproximação na predição de atributos do solo por meio da análise digital do terreno e verificou que mesmo não havendo conhecimento quanto aos tipos de relações entre as variáveis, o método possibilitou a melhora no mapeamento da espessura do horizonte A e do pH, em comparação com os dados observados. Bishop & McBratney (2001) verificaram que a regressão linear múltipla apresentou bons resultados na predição da capacidade de troca catiônica do solo utilizando diferentes combinações de informações secundárias.

Entretanto, Bourennane *et al.* (2000) verificaram que o método *krigagem* apresentou melhores resultados, quando comparado com a regressão linear para predição da espessura de horizontes dos solos, contudo, com o aumento do volume de dados, a *krigagem* apresentou melhor desempenho, já a regressão linear manteve o mesmo desempenho. Valadares & Pereira (2010) utilizaram dados SRTM e dados de temperatura do ar e regressão linear múltipla para mapeamento digital de solos.

Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi utilizar regressão linear múltipla para o mapeamento de solos para regiões do cerrado, utilizando como estudo de caso a bacia do Ribeirão do Gama, no Distrito Federal. Essa bacia foi selecionada por diversas razões, dentre elas, por possuir áreas com a vegetação natural preservada e outras com áreas já urbanizadas, além de se tratar de uma área relevante para garantia de abastecimento público de água no DF e por dispor de dados de campo.

#### **4.4 - Material e Métodos**

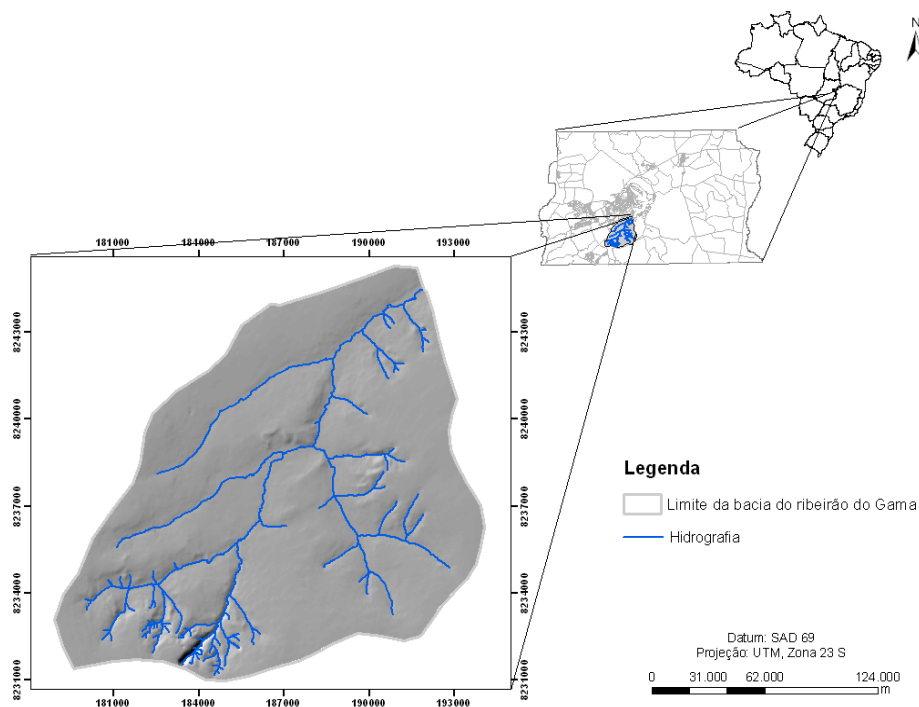
A bacia do ribeirão do Gama possui uma área de 141,20 km<sup>2</sup>, localiza entre as coordenadas UTM, fuso 23S, 191664 m e 179621m sul e 8245203m e 8231473 m oeste, (*South American Datum*) inserida no Bioma Cerrado (Figura 8).



O clima predominante na região de estudo, segundo a classificação de Köppen, enquadra-se entre o tropical de savana e o temperado chuvoso de inverno seco, com concentração da precipitação pluviométrica no verão (Martins, 1998). As precipitações variam entre 1.500 e 2.000 mm anuais, sendo a média em torno de 1.600 mm, alcançando em janeiro o seu maior índice pluviométrico (320 mm/mês) (Embrapa, 1978).

A geologia da bacia do ribeirão do Gama compreende o Grupo Paranoá, de idade Meso/Neoproterozóico (1.300 a 1.100 milhões de anos), sendo caracterizado por Ardósias e Metarritmitos Arenosos (Freitas-Silva & Campos, 1998).

A geomorfologia da região do Distrito Federal vem sendo objeto de estudo há vários anos e existe um relevante acervo de estudos tais como Codeplan (1984), Novaes Pinto (1986, 1987 e 1994a, 1994b), Novaes Pinto & Carneiro (1984) e Martins & Baptista (1998). Na bacia em estudo, de acordo com Codeplan (1984) a compartimentação geomorfológica proposta separa dois pediplanos, superfícies residuais de aplainamento nas cotas mais elevadas, depressões interplanálticas e planícies. O Pediplano Contagem-Rodeador apresenta as cotas mais elevadas, entre 1200 e 1400 m.



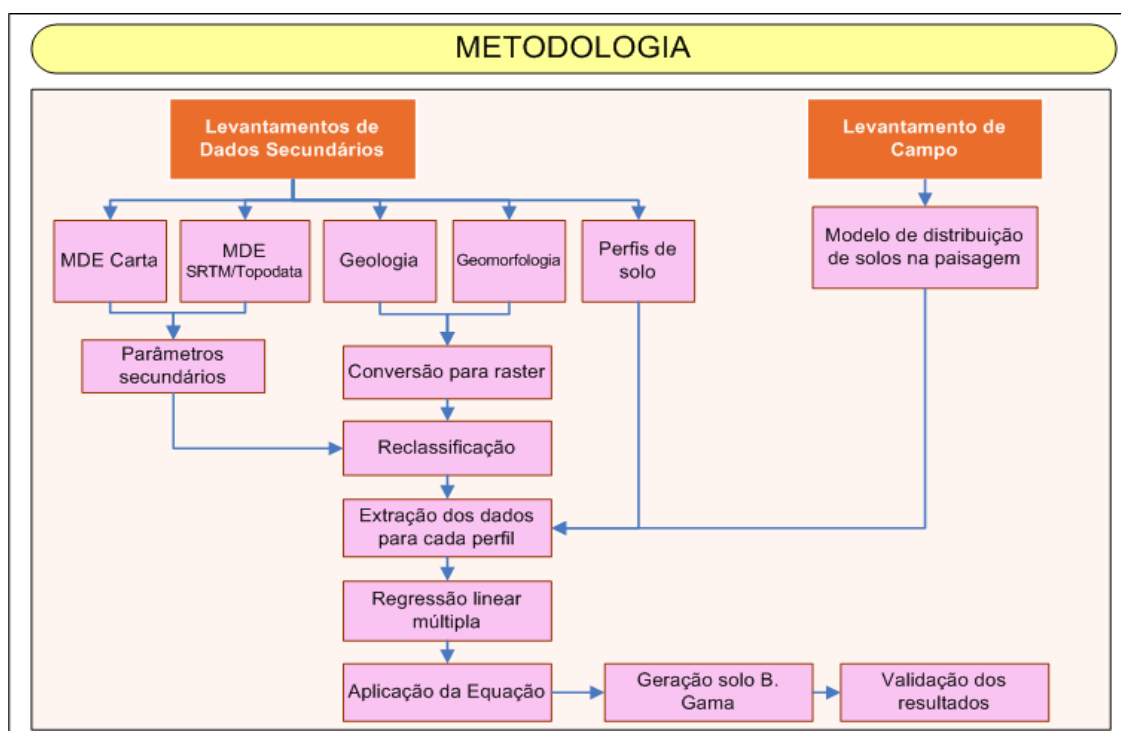
**Figura 8.** Mapa de localização da bacia do Ribeirão do Gama.

Estas áreas são representadas por chapadas, chapadões e interflúvios tabulares. O Pediplano de Brasília está embutido no Pediplano Contagem-Rodeador, e ocupa uma extensa área, com cotas que variam de 950 a 1200 m. As Depressões Interplanálticas e o Planalto

Dissecado do Alto Maranhão abrangem áreas menores e mais baixas que os outros compartimentos, com altitudes entre 800 a 950 m. As planícies aluviais e alveolares correspondem às áreas mais baixas e de formação mais recentes, relacionados ao Holoceno. O relevo apresenta formas planas elaboradas sobre sedimentos fluviais.

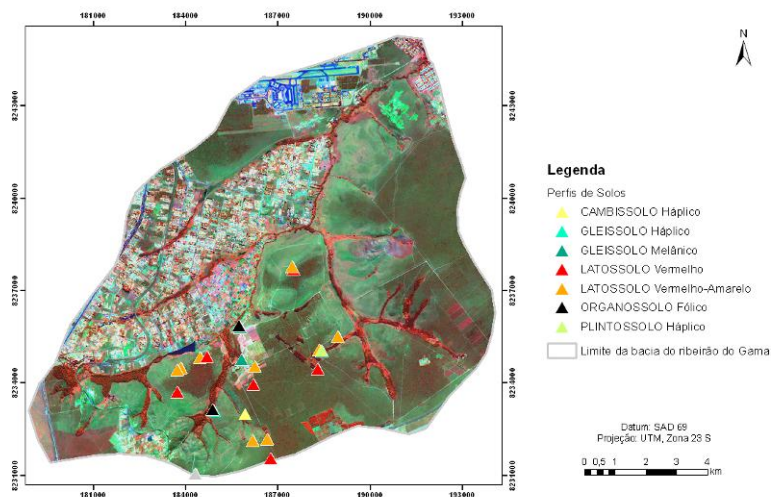
A principal fonte de informações pedológicas, para Distrito Federal (DF), é o levantamento de reconhecimento de solos realizado pela Embrapa (1978), com elaboração de mapa pedológico em escala 1:100.000. A bacia do ribeirão do Gama apresenta principalmente as seguintes classes de solos o Latossolo Vermelho, o Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo, Solos Hidromórficos Indiscriminados e Plintossolos.

Os estudos foram desenvolvidos nas etapas descritas na Figura 9.



**Figura 9.** Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.

Primeiramente foram levantadas na bibliografia, a localização e a descrição dos vinte e três perfis de solos descritos na área de estudo (Barbosa, 2007, Campos, 2009). Cada perfil, com sua localização e sua descrição até o segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Embrapa, 2006) foi incorporado ao banco de dados no formato vetorial (ponto) com todos os atributos relacionados e processados no Sistema de Informação Geográfica ArcGis 9.2® (Figura 10).

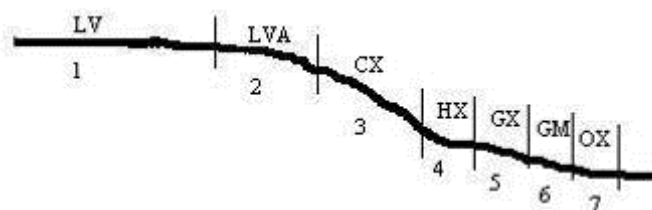


**Figura 10.** Mapa de localização dos perfis de solos descritos na bacia do Ribeirão do Gama.

Vale salientar que para cada classe de solo, foi atribuído um valor, em que se considerou a distribuição dos solos ao longo da topossequência representativa da área (Figura 11).

Após a avaliação dos MDEs, para o MDE obtido por meio de carta foram gerados os seguintes parâmetros secundários: aspecto, acumulação de fluxo, declividade, altitude, perfil de curvatura e curvatura plana. Para o MDE SRTM-Topodata foram utilizados os parâmetros disponíveis na página do projeto Topodata (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>).

No estudo também foram utilizados os planos de informação de geomorfologia (Codeplan, 1984) e geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998). Esses planos de informação foram convertidos para o formato raster e foram reclassificados de forma a reduzir o impacto das diferenças de magnitude dos valores na regressão (Tabela 2).



**Figura 11.** Perfil representativo da distribuição das classes de solos na bacia do Ribeirão do Gama.

1: LV ó Latossolo Vermelho; 2: LVA ó Latossolo Vermelho-Amarelo; 3: CX ó Cambissolo Háplico; 4: HX ó Plintossolo Háplico; 5: GM ó Gleissolo Melânico; 6: GX ó Gleissolo Háplico; 7: OX ó Organossolo Háplico

Os parâmetros derivados de cada MDE foram tratados separadamente e então para cada perfil de solo foram extraídos os valores dos parâmetros derivados dos MDEs (aspecto, acumulação de fluxo, declividade, altitude, perfil de curvatura e curvatura plana) e da

geomorfologia e geologia e estas informações foram então inseridas no pacote estatístico SPSS 16.0®.

**Tabela 2.** Valores atribuídos às variáveis obtidos dos MDEs e dos planos de informação Geológica e Geomorfológica.

Variável	Classes	Valores
Geomorfologia	Depressões Interplanal. Pediplano e Planalto Dissecado do Alto Maranhão	5
	Pediaplano Contagem Rodeador	2
	Pediaplano de Brasília	1
	Planícies Aluviais e Alveolares	3
Geologia	Ardósias	1
	Metarritmito Arenoso	0
Declividade	0,0 ó 3,0	1
	3,1 ó 12,0	2
	12,1 ó 45,0	3
	> 45,0 %	4
Acumulação de Fluxo	0	1
	0 - 383,82	2
	383,83 - 1151,47	3
	1151,48 - 3070,59	4
	3070,60 - 7292,66	5
	7292,67- 15736,79	6
	>15736,80	7
Altitude	1002,23 - 1037,35	1
	1037,353202 - 1072,48	2
	1072,49 - 1107,61	3
	1107,62 - 1142,73	4
	1142,74- 1177,86	5
	1177,87 - 1212,99	6
	> 1212,98945	7
Aspecto	0 - 51,43	1
	51,44 - 102,86	2
	102,857 - 154,28	3
	154,29 - 205,71	4
	205,72 - 257,14	5
	257,15 - 308,57	6
	>308,58	7
Curvatura Plana	-10,85 - -5,71	1
	-5,72 - -2,32	2
	-2,33 - -0,69	3
	-0,70 - -0,15	4
	-0,16 - 0,03	5
	0,04 - 0,76	6
	0,77 - 4,63	7

Separadamente, ou seja, para os dados provenientes do MDE obtido por meio de carta e MDE SRTM-Topodata foi realizada e executada análise de regressão linear múltipla, sendo as classes de solos a variável dependente e as variáveis aspecto, acumulação de fluxo, declividade, altitude, perfil de curvatura e curvatura plana) e da geomorfologia e geologia, como variáveis independentes. Após a realização da regressão linear múltipla, verificou-se quais variáveis foram significantes no modelo ao nível de 95% de probabilidade e a regressão foi novamente realizada apenas com as variáveis significantes.

Para verificar a relevância de cada parâmetro foi observado o valor do teste F e sua significância e o valor do coeficiente de correlação. Como resultado, foi gerado uma função de ocorrência de solos.

Por meio da função *Raster Calculator* do programa ArcGis 9.2®, a equação de distribuição de solos foi inserida na SIG e foi elaborado o mapa de solos da bacia do ribeirão do Gama.

Para avaliar a exatidão do mapeamento comparou-se o mapa de solos obtido por meio da regressão linear múltipla com o mapa de solo da Embrapa (1978). A relação entre estes dois conjuntos de informações foi resumida em uma matriz de confusão (Lillesand & Kieffer, 1994). A matriz de erros ou de confusão identificou o erro global da classificação para cada classe de solo, mostrando também como se deram as confusões entre as classes. Conforme sugerido por Gong & Howard (1990), foi utilizado o índice kappa para mensurar a exatidão do mapeamento.

#### **4.5 - Resultados e Discussão**

Na tabela 3 pode-se observar o resultado da regressão linear múltipla com os valores dos coeficientes de regressão para cada variável com ambos MDEs e sua respectiva significância estatística.

Verificou-se que utilizando os atributos do terreno geradas por meio do MDE obtido por meio de carta, apenas a declividade e a geomorfologia foram estatisticamente significantes ao nível de 95% de probabilidade. Ippoliti *et al.* (2005) também verificaram que a declividade foi um dos principais fatores de relevo que influenciaram na distribuição dos solos.

**Tabela 3.** Valores dos coeficientes de regressão.

Variável	MDE-Carta		MDE-SRTM/Topodata	
	Coefficiente Regressão	Significância	Coefficiente Regressão	Significância
Constante	-6,084	0,164	18,045	0,010
Altitude	0,042	0,906	-2,10	0,069
Declividade	1,465	0,000*	-1,863	0,088
Aspecto	0,162	0,415	0,173	0,275
Curvatura	0,465	0,092	-1,097	0,111
Geologia	0,577	0,398	0,347	0,716
Geomorfologia	1,754	0,001*	0,149	0,786
Acumulação de Fluxo	0,316	0,761	1,310	0,237

\* Coeficientes estatisticamente significantes ao nível de 99% de probabilidade.

Os mesmos procedimentos foram realizados para os dados provenientes do MDE SRTM/Topodata e os resultados mostraram que nenhuma das variáveis foi significativa no nível de probabilidade de 95%. O que pode ser em razão das características da obtenção e da escala dos dados do SRTM que não possibilitou a captura dos detalhes das feições do terreno da bacia do ribeirão do Gama. De acordo com Chagas *et al.* (2010) o MDE, derivado de curvas de nível (carta) apresentou qualidade superior aos MDEs derivados de sensores remotos (ASTER e SRTM). Kocak *et al.* (2004) e Gerstenecker *et al.* (2005), também mostraram que a exatidão dos MDEs derivados de sensores remotos é muito dependente da inclinação do terreno, sendo de mais baixa qualidade em áreas declivosas que em áreas planas. Entretanto, a bacia do ribeirão do Gama apresenta relevo plano.

A regressão foi novamente elaborada apenas com as variáveis do MDE obtido por meio de carta que foram significativas ao nível de 95% (Tabela 4) e obteve-se um coeficiente de correlação de 0,812.

**Tabela 4.** Valores dos coeficientes de regressão.

Modelo	Coefficiente de Regressão	Significância
Constante	-1,995	0,029
Declividade	1,235	0,000*
Geomorfologia	1,542	0,000*

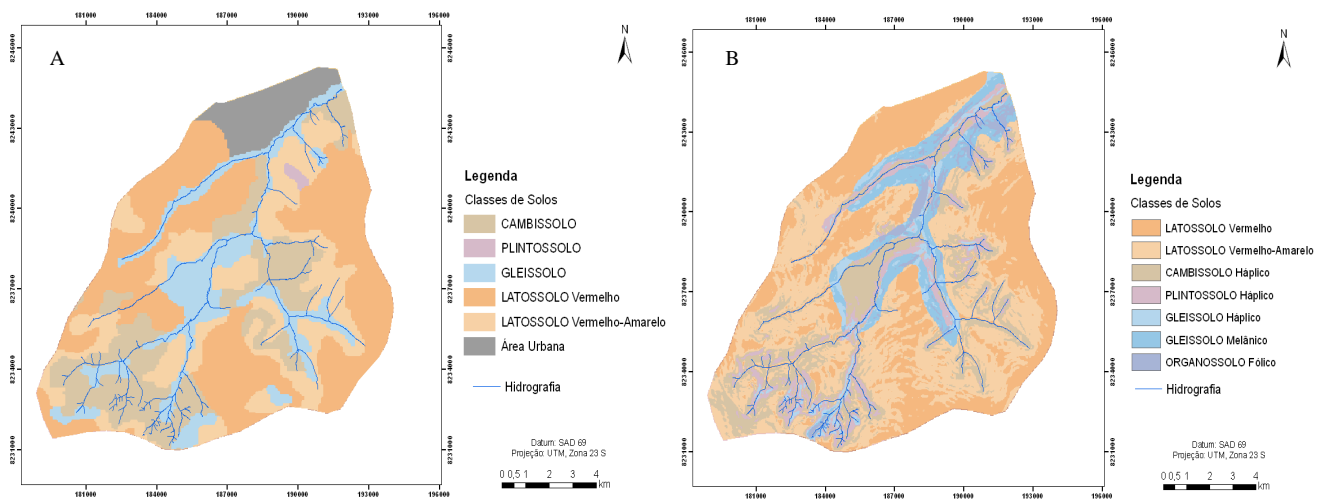
\* Coeficientes estatisticamente significantes ao nível de 99% de probabilidade.

Por meio dos coeficientes de regressão, tabela 4, foi elaborada a equação de distribuição de solos na bacia do ribeirão Gama (Eq. 1) e que possibilitou elaborar o mapa de solos (Figura 10).

Ao se comparar o mapa de solos predito por meio da equação 1 com o mapa da Embrapa (1978) (Figura 12), verificou-se, a concordância de classes de solos na bacia do ribeirão do Gama, principalmente da classe Latossolo Vermelho e que apresentou acurácia do usuário (AU) 64,06% e acurácia do produtor (AP) 48,43%. Entretanto, houve confusão entre a Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, que apresentou acurácia um pouco inferior, AU 26,8% e AP 41,9% (Tabela 4).

$$\text{Classesolos} = 1,995 + 1,235*(\text{Declividade}) + 1,542*(\text{Geomorfologia}) \quad (1)$$

A acurácia global do mapeamento foi 39,05% e o índice Kappa foi 18,9%, valor esse considerado baixo, indicando uma baixa qualidade na predição. As classes de solos Plintossolo Háptico, Gleissolo Melânico e Organossolo Fólico não apresentaram concordância entre o mapa gerado predito e o mapa original (Embrapa, 1978), o que pode ter decorrido da diferença de escala do mapeamento. Entretanto, a classe Gleissolo Háptico apresentou AP de 39,1% e AU 10,6%. Para melhorar a capacidade dos modelos em prever os solos Bailey *et al.* (2003) sugerem que se desconsidere as classes com área menor do que 5% da área total.



**Figura 12.** Mapa de solos da bacia do ribeirão do Gama (Embrapa, 1978) (A), Mapa de solos gerado por meio da equação 1(B).

Uma vantagem desse tipo de metodologia é a possibilidade de mapeamento de áreas urbanizadas. Como não há mapa de solos em uma porção da bacia, pois na época da realização do levantamento de reconhecimento pedológico elaborado pela Embrapa (1978) a área já se encontrava urbanizada, que coincide com área do aeroporto internacional de

Brasília, a utilização dessa metodologia também possibilitou o mapeamento preliminar da área.

**Tabela 5.** Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, usando regressão linear múltipla.

Mapa Predito	Mapa Original							AU %
	LV	LVA	CX	HX	GX	GM	OX	
LV	19,27	4,54	1,50	0,02	0,87	0,00	0,00	64,06
LVA	16,59	9,67	5,82	0,31	3,07	0,00	0,00	46,00
CX	1,87	4,32	6,05	0,10	6,09	0,00	0,00	10,13
HX	0,43	0,96	3,24	0,00	2,56	0,00	0,00	5,90
GX	0,47	0,55	1,40	0,00	1,70	0,00	0,00	10,86
GM	1,09	2,19	1,44	0,01	1,57	0,00	0,00	14,56
OX	0,07	0,84	1,23	0,00	0,14	0,00	0,00	2,60
Total	39,80	23,07	20,69	0,45	16,00	*	*	
AP %	48,43	41,93	29,26	0,00	10,62	*	*	
<b>AG % 39,05</b>								
<b>Kappa% 18,90</b>								

\* classe não ocorrente no mapa produzido.

Portanto, a adoção de uma metodologia quantitativa pode facilitar a reprodução do processo e maneira mais ágil. Mas os resultados dependem fortemente da amostragem, das classes de solo e das variáveis escolhidas e, portanto estudo em áreas piloto, como o utilizado nesse estudo é relevante para a identificação das incertezas e essas identificadas sirvam de base para a elucidação dos diferentes fatores que participam do processo, como erros na base de dados, na modelagem e/ou identificação de variável relevante que não abordado na base de dados.

Futuros trabalhos poderão ser baseados nos locais de incertezas considerando os diferentes tipos de erros de modelagem e assim poderá melhorar o processo de mapeamento de solos.

#### 4.6 - Conclusões

Verificou-se que o modelo digital de elevação obtido por meio de carta obteve melhor desempenho do que no mapeamento digital de solos por meio de regressão linear múltipla.

Apenas as variáveis declividade e geomorfologia apresentaram coeficientes significantes na regressão linear múltipla.



As classes Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo apresentaram boa correspondência com o mapa original.

Verificou-se que a metodologia utilizada pode permitir mapear solos em áreas urbanizadas.

## **CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM 6 TOPODATA NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS, NO DISTRITO FEDERAL**

### **5.1 - Resumo**

O uso de modelagem quantitativa no mapeamento digital dos solos tem se desenvolvido com o surgimento de novos métodos mais eficientes e econômicos. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo digital de elevação provenientes do *Shuttle Radar Topography Mission* reamostrado para 30m e o uso da regressão linear múltipla no mapeamento digital dos solos no Distrito Federal. Os estudos foram divididos em três etapas: compilação dos perfis de solos já descritos na área de estudo; análise dos modelos digitais de elevação e seus parâmetros derivados (declividade, altitude, forma do terreno, divisores e talvegues, curvatura horizontal, orientação, acumulação de fluxo e índice topográfico de umidade) e os mapas geomorfológico e geológico; e por último a análise de regressão linear múltiplas para a geração do mapa de solos. Verificou-se que apenas a declividade, altitude e litologia foram relevantes, e que a metodologia utilizada permitiu mapear os solos em áreas não amostradas e possibilitou o mapeamento de solos em áreas já urbanizadas.

**Palavras-chave:** pedometria, sistema de informação geográfica

## **5.2 - Abstract**

*The use of quantitative modeling in digital soil mapping has been developed with the emergence of new and more efficient methods economic. In this sense, this study aimed to evaluate the applicability of the digital elevation model from Shuttle Radar Topography Mission resampled to 30m and the use of regression Multiple linear digital soil mapping in the Federal District. The studies were divided into three steps: collection of soil profiles already described in the study area, analysis of digital elevation models and its derived parameters (slope, elevation, terrain shape, dividers and talwegs, horizontal curvature, orientation, accumulation of flow and topographic moisture index) And geomorphological maps and geological, and finally the multiple linear regression analysis to the soil map generation. It was found that only the slope, altitude and lithology were relevant. It was found that the methodology allowed mapping soils in not sampled areas and allowed also mapping soils in urbanized areas.*

**Key-words:** *pedometrics, geographic information system*

### 5.3 - Introdução

O uso de modelos digitais de elevação na compreensão e identificação da distribuição dos solos, formulados com base em MDEs, contribui como importante ferramenta para delimitar unidades preliminares de mapeamento dos solos, utilizadas no suporte aos trabalhos de levantamentos de solos na fase de campo e apoio à cartografia pedológica (Nanni & Rocha, 1997 e Hengl, 2003).

A modelagem digital do relevo é uma das técnicas quantitativas melhor desenvolvidas para prever atributos e classes de solos (McKenzie & Ryan, 1999). Diferentes atributos podem ser derivados de um MDE (Wilson & Gallant, 2000) e dentre estes atributos a elevação, a declividade e a orientação, têm sido reconhecidos como os mais efetivos para a realização de levantamentos de solos de média escala (Chagas, 2006e Campling *et al.*, 2002, Debella-Gilo *et al.* 2007, Bailey *et al.*, 2003, Figueiredo, 2006). Embora, Odeh *et al.* (1991), verificaram que a declividade e a curvatura explicam grande parte da variabilidade dos solos.

Os MDEs podem ser provenientes da interpolação de dados obtidos por meio de cartas topográficas ou de sensores remotos, como o elaborado por meio da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Diversos estudos vêm sendo realizados objetivando a análise, comparação e atualização de informações da superfície terrestre, por meio de dados do SRTM. Assim, podem-se citar os trabalhos desenvolvidos por Santos *et al.* (2006), Fredrick *et al.* (2007), Luedeling *et al.* (2007), Berry *et al.* (2007) e Valeriano & Abdon (2007).

A missão SRTM trouxe um grande avanço na aquisição de dados topográficos, pois permitiu que dados altimétricos fossem obtidos a partir de um único sobrevôo que recobriu 80% da superfície terrestre em apenas 11 dias, entre as latitudes de 60° Norte e 56° Sul. O sobrevôo forneceu modelos tridimensionais com qualidade e com duas resoluções espaciais, de 1 arc sec (30 metros) e de 3 arc sec (90 metros), com *datum* horizontal WGS84 e *datum* vertical WGS84/EGM96, com acuidade vertical relativa na ordem de 5 metros (Smith & Sandwell, 2003).

De acordo com Santos *et al.*, 2005 e Smith & Sandwell, 2003, a aquisição de dados de forma contínua dentro de uma mesma metodologia garantiu a obtenção homogênea de dados ao longo de todo o globo, tornando o SRTM uma importante ferramenta para os estudos da superfície terrestre. Foram gerados Modelos Digitais de Elevação (MDE) sob resolução de 30m (a rigor, em coordenadas geográficas, como 1 arco segundo, ou 1 $\emptyset$ ) para os Estados Unidos e planejados sob 90m (a rigor, 3 $\emptyset$ ) para o resto do mundo (Smith & Sandwell, 2003).

Embora os dados SRTM apresentem algumas características indesejáveis, para um país de escala continental como o Brasil, pois grande parte do território nacional é provida de mapeamento em escalas demasiadamente generalizadas, esta informação é de grande valor (Valeriano 2008). Por este aspecto, pode-se considerar o dado SRTM como a melhor informação topográfica já disponibilizada que cobre todo o território nacional (Valeriano, 2003).

Produtos gerados na iniciativa Topodata, oferecem livre acesso a variáveis geomorfométricas derivadas de dados SRTM para todo o território brasileiro (Valeriano, 2004). Estes dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por *krigagem*. Em seguida, foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Além dessas variáveis, uma derivação de segundo grau foi aplicada com vistas a identificar e ressaltar os talwegues e divisores de água, cujos resultados foram combinados à orientação de vertentes para favorecer a interpretação das feições de drenagem. As variáveis geomorfométricas foram ainda classificadas para a geração de mapas não-numéricos, tais como as classes de declividade consagradas pela pesquisa agrônômica (classes Embrapa, por exemplo), as curvaturas em convexo/planar/côncavo, bem como possíveis formas de vertentes, entre outras representações qualitativas (Valeriano, 2008).

De acordo com McBratney *et al.* (2003) o sucesso ao se ajustar uma função para descrever o solo depende do número de variáveis de predição observadas em determinado local, da densidade de amostras para estabelecer uma dada relação, da disponibilidade e flexibilidade de funções para ajuste de relações não lineares e da relação entre solo e meio ambiente.

Dentre os modelos lineares mais utilizados em ciência do solo podem ser citados os modelos de regressão para estimativas de propriedades, e classificações para as estimativas de classes de solo, tais como os utilizados por Moore *et al.* (1993c), Arrouays *et al.* (1995), Skidmore *et al.* (1997), Lee *et al.* (1998), Hengl *et al.* (2002), Florinsky *et al.* (2002), Odeh *et al.* (2007).

Além disso, modelos de regressão têm sido amplamente aplicados para estimativas em representações espaciais de solo, associado, por vezes, com métodos de interpolação. Moore *et al.* (2001) estabeleceram a relação entre atributos de terreno e propriedades de solo por meio de regressão linear múltipla para estimar espessura de horizonte A e pH. Arrouays *et al.* (1995) estimaram o conteúdo de C orgânico no solo a partir da matéria orgânica, textura, bem

como variáveis climáticas (chuva e temperatura) e de terreno (declive), além da ocupação do solo no sul da França.

Skidmore *et al.* (1997) utilizaram imagens *Landsat* e amostras de solo para estimativa de teor de P e valor de pH por meio de regressão linear em uma área silvícola na Austrália e verificaram que o teor e o valor de pH foram correlacionáveis com o a imagem *Landsat TM*. Hengl *et al.* (2002) mapearam pH e matéria orgânica utilizando parâmetros de vegetação extraídos de imagens AVHRR, parâmetros de terreno (elevação, curvatura, declividade, índice de umidade), parâmetros climáticos (regime de chuvas e temperatura) e observações de solos do levantamento nacional Croata. Verificaram que a predição da matéria orgânica apresentou melhores resultados do que o pH.

Bishop & McBratney (2001) utilizaram MDE, fotos aéreas, imagens *Landsat TM*, dados de monitoramento de colheita, condutividade elétrica e 113 amostras de solo para estimar a capacidade de troca de cátions ó CTC, por meio de regressão linear múltipla, modelos aditivos, árvores de regressão, *krigagem* dos resíduos desses modelos, *krigagem* ordinária e *krigagem* com deriva externa. A *krigagem* com deriva externa e as *krigagem* dos resíduos da regressão linear múltipla e da árvore de regressão foram os métodos que mais se destacaram.

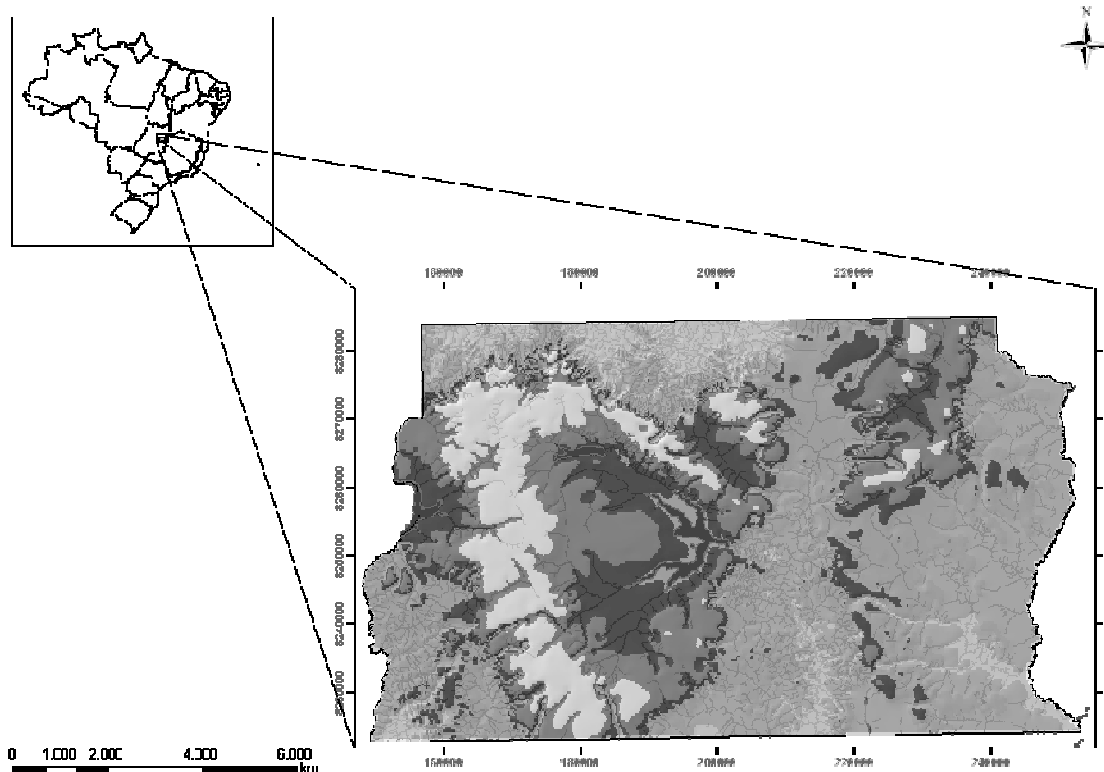
Odeh & McBratney (2000) compararam quatro métodos para estimar teores de argila no solo, sendo a regressão linear múltipla com conjunto de treinamento externo, regressão linear múltipla com conjunto de treinamento interno, *krigagem* com função intrínseca de ordem 1 (IRF1) e *krigagem* dos resíduos do modelo de regressão. A *krigagem* dos resíduos da regressão foi o método que melhor incorporou a imagem AVHRR, enquanto os resultados da IRF1 mostraram-se muito suavizados e os modelos de regressão pobres.

Diante do exposto, o objetivo desse estudo foi utilizar os atributos morfométricos derivados dos dados do SRTM reamostrado, pela iniciativa Topodata, em conjunto com informações geológicas para o mapeamento de solos no Distrito Federal, por meio de regressão linear múltipla.

## **5.4 - Material e Métodos**

### **Caracterização da Área**

O Distrito Federal possui uma área 5.814 km<sup>2</sup> e está localizado no Planalto Central Brasileiro, limitado pelos paralelos de 15030<sup>o</sup>S e 16003<sup>o</sup>W, situado na Província Fitogeográfica do Cerrado (Figura 13).



**Figura 13.** Mapa de localização da área de estudo.

O clima predominante na região de estudo, segundo a classificação de Köppen, enquadra-se entre o tropical de savana e o temperado chuvoso de inverno seco, com concentração da precipitação pluviométrica no verão. É caracterizado pela existência de duas estações: uma chuvosa e quente, que se inicia no mês de outubro e termina em abril e outra, fria e seca, que se estende de maio a setembro (Martins, 1998).

A coluna estratigráfica do DF, considerando a ordem deposicional da base para o topo, é composta pelos grupos Canastra (15% da área) ó filitos / corpos lenticulares de mármore e quartzitos), Paranoá (65% da área) ó Quartzito/Metassiltitos/Ardósias/Metarritmito/Unidade Psamo-pelito-carbonatada), Araxá (5% da área - xistos) e Bambuí (15% da área) ó metassiltitos e arcóseos) (Figura 14).

O Grupo Paranoá de idade Meso/Neoproterozóico (1.300 a 1.100 milhões de anos) ocupa cerca de 65% da área total do DF, sendo possível caracterizar sete unidades litoestratigráficas correlacionáveis, da base para o topo, com as seqüências deposicionais. (Campos, 2004; Freitas-Silva & Campos, 1998; ZEE, 2011):

**Unidade Q2 - Quartzito Conglomerático:** quartzitos grossos até conglomeráticos na base que passam a quartzitos médios em direção ao topo da seqüência.

**Unidade S - Metassilito Argiloso:** composta por um conjunto de metassilitos argilosos homogêneos com coloração cinza esverdeada a amarelada quando frescos, passando a tons rosados e vermelho-escuro com o aumento da alteração intempérica.

**Subunidade Sa:** composta por metassilitos intercalados com níveis de quartzitos finos variando em espessuras desde centímetros a decímetros.

**Subunidade Sb:** caracterizada por um conjunto homogêneo de metassilitos argilosos.

**Subunidade SC:** caracterizada por um metarritmito com bancos de quartzitos arcoseanos, decimétricos, geralmente rosados e comumente com aspecto maciço ou, mais raramente, finamente laminados.

**Unidade A - Ardósia:** caracterizada por ardósias roxas quando alteradas ou cinza-esverdeadas quando frescas e sempre com aspecto homogêneo.

**Unidade R3 - Metarritmito Arenoso:** caracterizada por alternâncias de estratos centimétricos a métricos de quartzitos finos a médios com níveis geralmente mais delgados de metassilitos argilosos, metalamitos siltosos e metalamitos micáceos.

**Subunidade R3a:** pacote de metassilitos argilosos, onde níveis de metalamitos são frequentes em direção ao topo. Na medida em que os níveis metapelíticos se tornam cada vez mais raros até desaparecem, aumentam os leitos quartzíticos que formam intercalações milimétricas a métricas, passando a predominar no topo da seção a qual termina com um nível espesso de quartzito, denominado de **q1**. O Quartzito **q1** apresenta coloração branca/ ocre, granulação fina a média e espessura variável entre 8 e 20 metros (apresenta caráter lenticular).

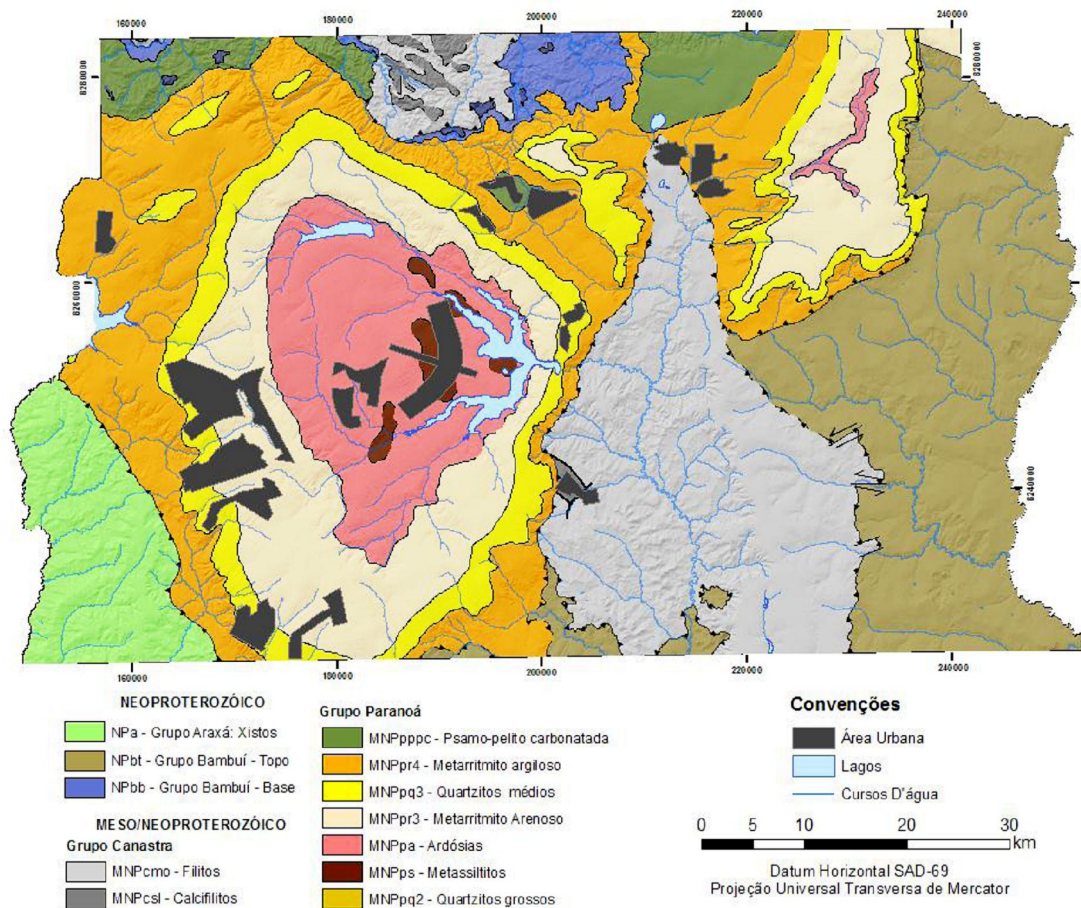
**Subunidade R3b:** inicia-se por contato gradacional sobre o quartzito q1, com metassilitos areno-argilosos que passam para uma sequência tipicamente rítmica onde se intercalam estratos argilosos, síltico-argilosos, síltico-arenosos, areno-siltosos e arenosos.

**Unidade Q3 - Quartzito Médio:** caracterizada por quartzitos finos a médios muito localmente grossos, brancos ou cinza-claros (cinza-escuros quando frescos), bem selecionados, maduros mineralogicamente, em geral muito silicificados e, onde se encontram menos recristalizados, mostram grãos arredondados.

**Unidade R4 - Metarritmito Argiloso:** é representada por um metarritmito homogêneo com intercalações centimétricas regulares de metassilitos, metalamitos e quartzitos finos que apresentam coloração cinza, amarelada, rosada ou avermelhada em função dos diferentes graus de intemperismo.

**Unidade PPC - Psamo-Pelito-Carbonatada:** apresenta contato transicional com a unidade sotoposta, sendo marcada pelo aumento progressivo dos metargilitos sobre os quartzitos e metassilitos.





**Figura 14.** Mapa geológico simplificado do Distrito Federal. (Fonte: Atualizado de Freitas-Silva & Campos, 1998).

O Grupo Canastra de idade Meso/Neoproterozóico (1.300 a 1.100 milhões de anos) ocupa cerca de 15 % da área total do DF, sendo distribuído pelos vales dos rios São Bartolomeu e Maranhão. O Grupo é constituído por rochas metamórficas de baixo grau, do fácies xisto verde, composto predominantemente por filitos com ocasionais lentes de quartzitos. Esta unidade aflora, continuamente, por mais de 650 quilômetros desde o sudoeste de Minas Gerais até a região sudeste de Goiás, ocorrendo predominantemente na porção centro-norte do Distrito Federal.

O Grupo Canastra é subdividido em três formações: Serra do Landim, Paracatu e Chapada dos Pilões (Freitas-Silva & Dardenne, 1994, ZEE, 2011).

**Formação Serra do Landim:** constituída por calcita-dolomita-clorita-sericita filito, em geral apresentando-se ritmicamente bandado

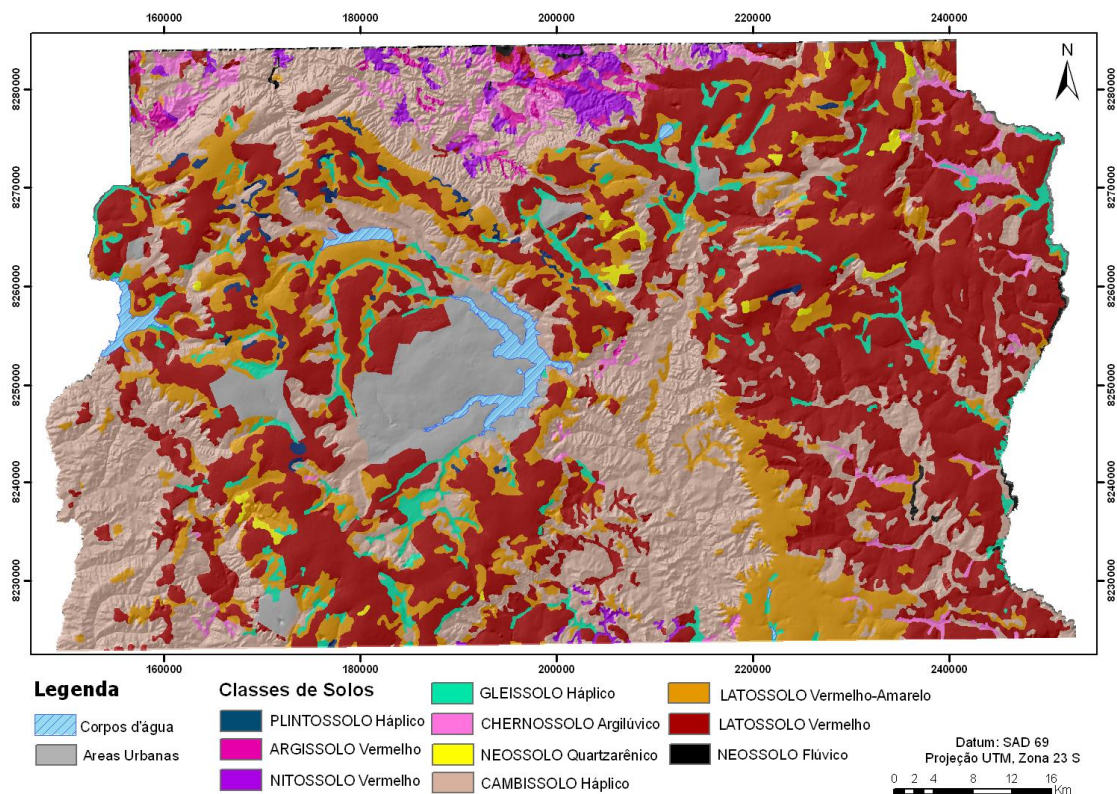
**Formação Paracatu:** constituída por filitos (filitos carbonosos e sericita-clorita-quartzo filitos) com intercalações de quartzitos e ocasionalmente mármores, que ocorrem nas imediações da cidade de Paracatu, no estado de Minas Gerais, estendendo-se até o Distrito Federal

**Formação Chapada dos Pilões:** constituída por intercalações decimétricas a decamétricas de quartzo-sericita-clorita filitos e quartzitos variados.

Os grupos Araxá (idade Neoproterozóica 950 a 750 milhões de anos), ocupa 5% da área do DF. É composto por xistos variados com ampla predominância de muscovita xistos e ocorrências restritas de clorita xistos, quartzo-muscovita xistos, granada xistos e lentes de quartzitos micáceos (Freitas-Silva & Dardenne, 1994, ZEE, 2011).

Por fim, o Grupo Bambuí perfaz cerca de 15% do DF, ocorrendo na porção leste ao longo do Vale do Rio Preto. É composto por metassiltitos laminados, metassiltitos argilosos e bancos de arcóseos, com cor de alteração rosada/ avermelhada e com cor de rocha fresca em vários tons de verde (Freitas-Silva & Dardenne, 1994, ZEE, 2011).

Com base no mapeamento pedológico realizado pelo Serviço Nacional de Levantamentos de Solos (Embrapa 1978), ratificado por Martins (1998) e revisado por Embrapa (2004) as classes de solos dominantes são: Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (C), recobrendo cerca de 90% da área do Distrito Federal (Figura 15).

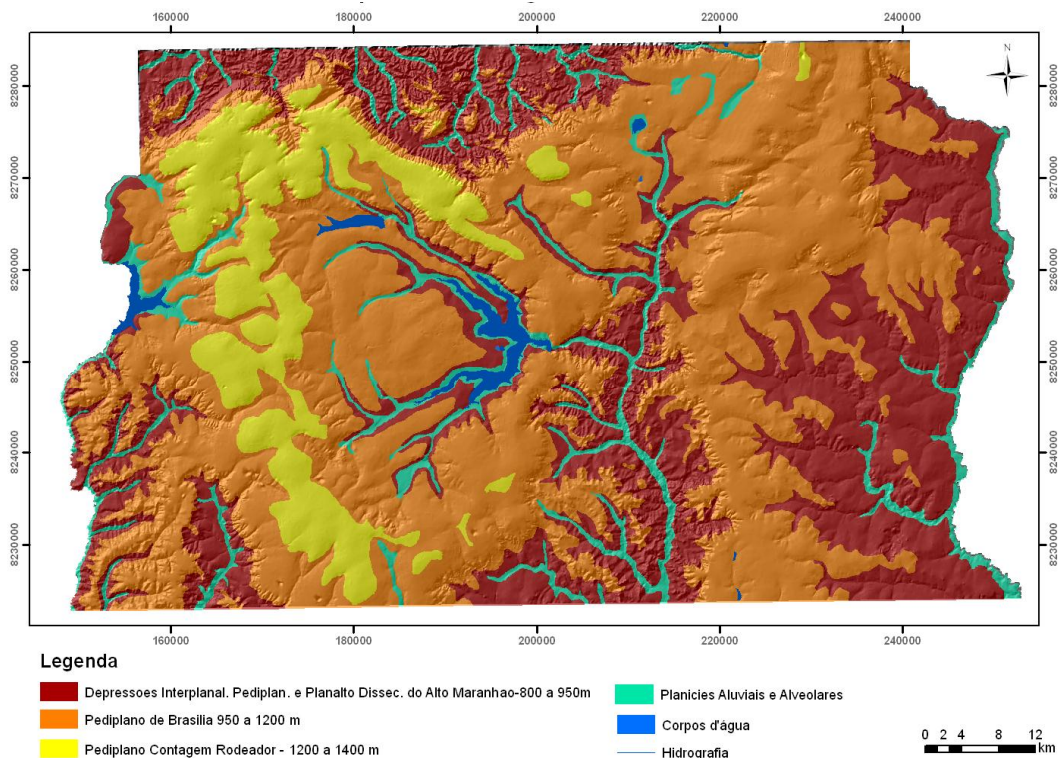


**Figura 15.** Mapa de solos original com legenda simplificada (Fonte: Embrapa, 2006).

Situado no Planalto Central, o Distrito Federal corresponde a remanescentes dos aplainamentos resultantes dos ciclos de erosão sul-americano e Velhas, desenvolvidos entre o Terciário Inferior e entre o Terciário Médio e Superior respectivamente (Braun, 1971).

Codeplan (1984) elaborou a compartimentação geomorfológica do Distrito Federal, caracterizando quatro domínios geomorfológicos. Estes domínios foram denominados de: Pediplano de Contagem-Rodeador; Pediplano de Brasília; Depressão Interplanáltica e Planalto Dissecado do Alto Maranhão; Planícies Aluviais e Alveolares. Os dois pediplanos foram interpretados como representantes de superfícies residuais de aplainamentos (Figura 16).

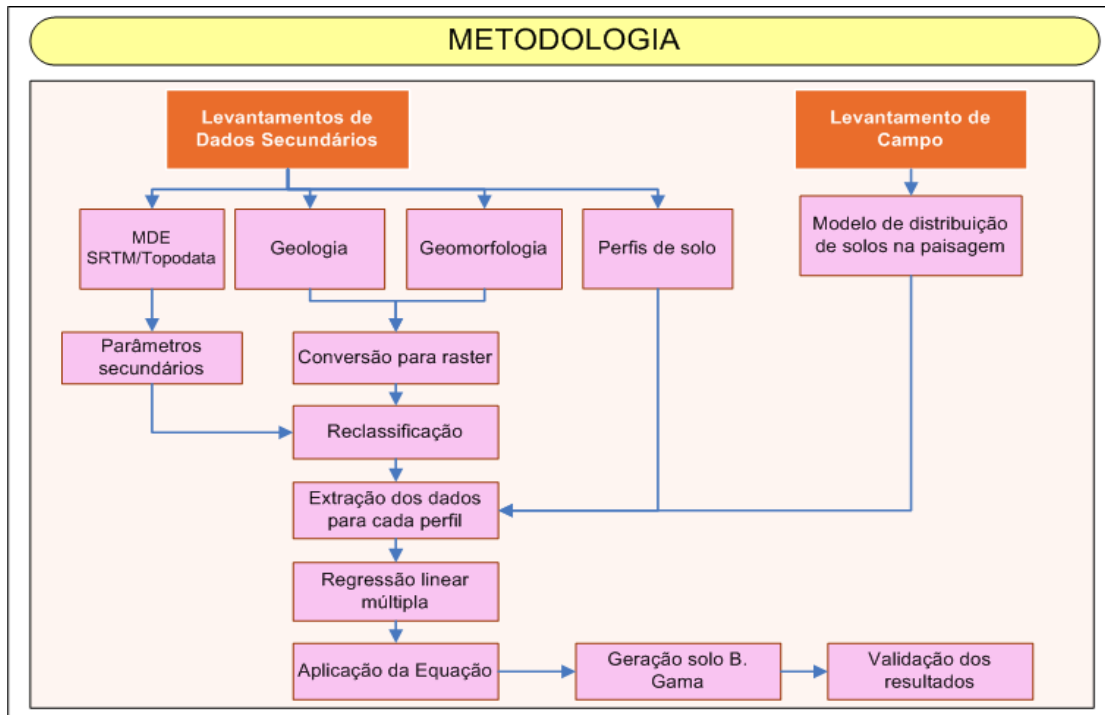
O Pediplano de Brasília encontra-se embutido no Pediplano Contagem-Rodeador através de nítidas rupturas de relevo, ocupando extensas áreas com cotas entre 950 e 1200m, onde predominam chapadas e interflúvios tabulares. O domínio Depressão Interplanáltica e Planalto Dissecado do Alto Maranhão corresponde a áreas mais baixas, situadas entre as cotas 800 e 950 metros, coincidentes com os vales dos grandes rios do Distrito Federal, apresentando, caracteristicamente, um relevo em colinas e interflúvios tabulares.



**Figura 16.** Mapa geomorfológico do Distrito Federal (Fonte: Codeplan, 1984).

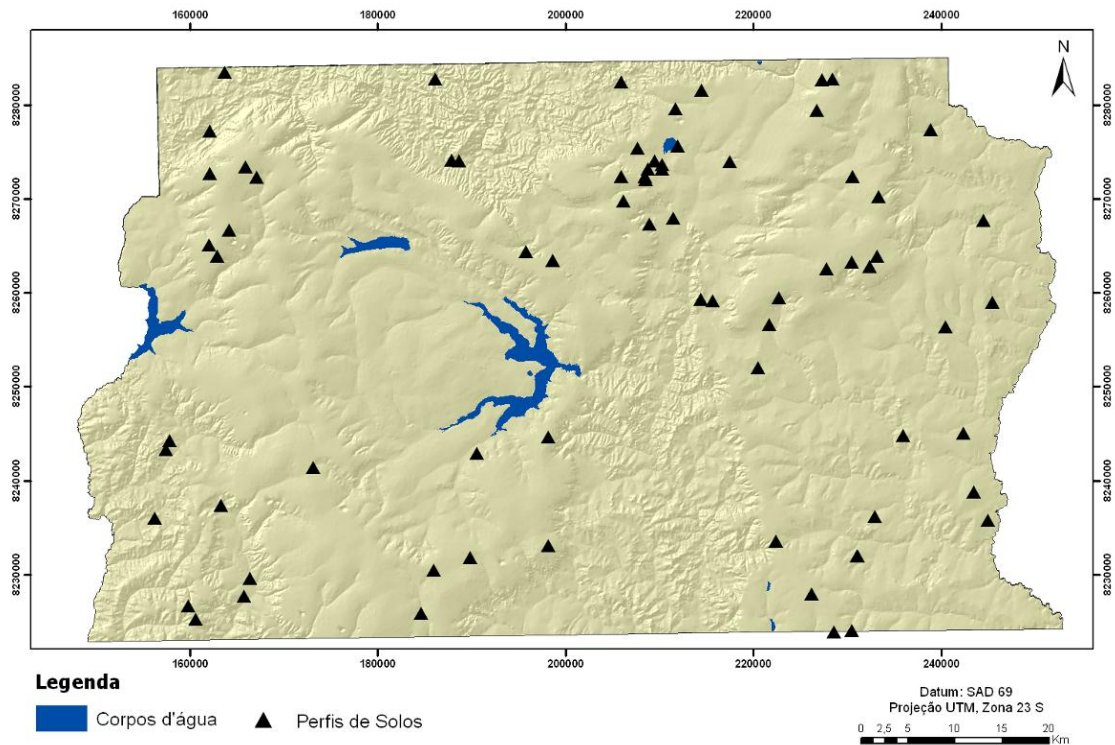
### Processamento dos dados

A metodologia utilizada está descrita na Figura 17.



**Figura 17.** Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.

Primeiramente foram levantadas na bibliografia, a localização e a descrição de setenta e cinco perfis de solos descritos no Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal (Embrapa, 1978). Cada perfil, com sua localização e sua descrição até o segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Embrapa, 2006) foi incorporado à base de dados no formato vetorial (ponto) utilizando o Sistema de Informação Geográfica ArcGis 9.2® (Figura 18).



**Figura 18.** Mapa de localização dos perfis de solos descritos no Distrito Federal (Fonte: Embrapa, 1978).

Para cada classe de solo, foi atribuído um valor ordenado, em que se considerou a distribuição esquemática dos solos na região do Planalto Central Brasileiro, de acordo com Motta (2002) (Tabela 6).

**Tabela 6.** Valores atribuídos às classes de solos no Distrito Federal.

Classes de Solos	Valor atribuído
LATOSSOLO Vermelho	10
LATOSSOLO Vermelho-Amarelo	9
CAMBISSOLO Háptico	8
PLINTOSSOLO Háptico	7
GLEISSOLO Háptico	6
NEOSSOLO Quartzarênico	5
ARGISSOLO Vermelho	4
NITOSSOLO Vermelho	3
CHERNOSSOLO Argilúvico	2
NEOSSOLO Flúvico	1

Também foram utilizados no estudo acumulação de fluxo e índice topográfico de umidade gerados por meio do programa de código aberto *System for Automated Geoscientific Analyses* (Böhner *et al.*, 2006).

No estudo também foram utilizados os planos de informação de geomorfologia (Codeplan, 1984) e geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998 atualizado). Esses planos de

informação foram convertidos para o formato *raster* e foram reclassificados de acordo com as Tabelas 7 e 8.

**Tabela 7.** Valores atribuídos às variáveis provenientes e geomorfologia (Codeplan, 1984) e geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998 atualizado).

Parâmetro	Classes	Valores
Geomorfologia	Depressões Interplanal. Pediplano e Planalto Dissecado do Alto Maranhão	4
	Pediplano Contagem Rodeador	2
	Pediplano de Brasília	1
	Planícies Aluviais e Alveolares	3
Geologia	*MNPpa, MNPpr3, MNPps, NPb, MNPpr4	1
	MNPpq2, MNPpq3	2
	MNPcf, NPa	3
	MNPppc	4
	MNPccf	5
	Lentes Carbonáticas	6

\* MNPpa: Ardósia; MNPpr3: Metarrimito Arenoso; MNPps: Metassiltito; NPb: Metassiltito Argiloso; MNPpr4: Metarrimito argiloso; MNPpq2: Quartizitos grossos; MNPpq3: Quartizitos médios; MNPcf: Carbonato Filito; NPa: Xistos; MNPppc: Psamo-pelito carbonatada; MNPccf: Clorita Carbonato Filito

Para cada perfil de solo foram extraídos os valores dos parâmetros derivados do MDE (declividade, altitude, forma do terreno, divisores e talwegues, curvatura horizontal e orientação, acumulação de fluxo e índice topográfico de umidade) e da geomorfologia e geologia e estas informações foram inseridas no pacote estatístico SPSS 16.0®.

Foi realizada a análise de regressão linear múltipla *stepwise*, sendo as classes de solos a variável dependente e as variáveis declividade, altitude, forma do terreno, divisores e talwegues, curvatura horizontal e orientação, acumulação de fluxo e índice topográfico de umidade, geomorfologia e geologia, como variáveis independentes. Verificou-se as variáveis significantes no modelo ao nível de 95% de probabilidade e foi então elaborada a equação de ocorrência de solos no Distrito Federal.

Por meio da função *Raster Calculator* do programa ArcGis 9.2®, a equação de distribuição de solos foi inserida no SIG e foi elaborado então o mapa de solos do Distrito Federal.

Foram utilizados 126 pontos de referência (perfis de solo, amostras extras e pontos de observação), não utilizados anteriormente no processo para avaliar a exatidão do mapeamento comparou-se o mapa de solos obtido por meio da regressão linear múltipla com perfis de solos descritos no campo em levantamentos de solos anteriores (Reatto *et al.*, 2000, Reatto *et al.*, 2003, Reatto *et al.* 2003a, Campos, 2009, Oliveira *et al.*, 2005).

**Tabela 8.** Valores atribuídos às variáveis obtido por meio do MDE SRTM/Topodata.

Parâmetro	Classes	Valores	
Declividade	0,0 ó 3,0	6	
	3,1 ó 8,0	5	
	8,0 - 12,0	4	
	12,1 ó 25,0	3	
	25,1 ó 45,0	2	
	> 45,1 %	1	
Altitude	729 - 902	6	
	902 - 970	5	
	970 - 1038	4	
	1038 - 1109	3	
	1109 - 1189	2	
	1189 - 1344	1	
Forma do Terreno	Convergente	côncavo	1
		retilíneo	2
		convexo	3
	Planar	côncavo	4
		retilíneo	5
		convexo	6
	Divergente	côncavo	7
		retilíneo	8
		convexo	9
Curvatura Horizontal	côncavo	1	
	retilíneo	2	
	convexo	3	
Orientação	0 - 43	1	
	43 - 87	2	
	87 - 131	3	
	131 - 176	4	
	176 - 222	5	
	222 - 269	6	
	269 - 315	7	
	315 - 359	8	
Acumulação de Fluxo	944 - 10.306,57	1	
	10.306,57 - 41.501,31	2	
	41.501,31 - 1.838.385,20	3	
Índice Topográfico de Umidade	7 - 11,29	1	
	11,30 - 13,02	2	
	13,01 - 17,19	2	

Quatro métodos estatísticos multinominais de se medir a acurácia de mapas foram usados: a acurácia geral (AG), que é a medida geral de adequação do modelo preditivo; acurácia do usuário (AU), que mede o quanto um usuário ao observar o mapa irá encontrar no campo a classe mapeada; acurácia do produtor (AP), que é o valor de concordância entre o campo e o estimado e a acurácia pelo coeficiente Kappa de Cohen (Rossiter, 2004).

A avaliação dos resultados foi realizada com medidas estatísticas como o índice Kappa e a exatidão global da classificação, derivados de uma matriz de confusão (Congalton & Green, 1993, Lillesand & Kieffer, 1994). A matriz de erros ou de confusão identificou o erro global da classificação para cada classe de solo, mostrando também como se deram as confusões entre as classes. Conforme sugerido por Gong & Howard (1990), foi utilizado o índice kappa para mensurar a exatidão do mapeamento.

Congalton (1991) sugere no mínimo 50 pontos para cada classe num caso geral, e 100 pontos caso a área avaliada seja muito grande ou o número de classes seja maior do que 12. Entretanto, a localização dos perfis de solos para validação não está uniformemente distribuída em toda a área de estudo e, portanto optou-se por realizar a validação em locais específicos, com densidades e tamanho de área distinta.

## 5.5 - Resultados e Discussão

Na tabela 9 pode-se observar o resultado da regressão linear múltipla com os valores dos coeficientes de regressão para cada variável e a respectiva significância estatística.

Cabe destacar que a variável altitude apresentou significância estatística inferior. Entretanto, essa variável é relevante para a distribuição de solos no Distrito Federal e, portanto foi incorporada ao modelo.

**Tabela 9.** Valores dos coeficientes de regressão.

Variável	Coefficiente de Regressão	Significância
Declividade	0,945	0,000*
Litologia	0,619	0,000*
Altitude	0,092	0,446

A forte influência que os atributos do terreno têm sobre os processos pedogenéticos e, conseqüentemente, sobre a distribuição dos solos na paisagem, foi ressaltada por Gallant & Wilson (2000) e Thompson *et al.* (2001). Crivelenti *et al.* (2009), ao utilizar uma técnica de mineração de dados (árvore de decisão) em um mapeamento digital de solos no Estado de São Paulo verificaram que os atributos do terreno que mais influenciaram a determinação das unidades de mapeamento foram a distância diagonal da drenagem, a declividade e a curvatura em perfil. Coelho (2009) verificou que a geologia foi o elemento com maior poder preditivo das unidades de mapeamento de solos, seguido da variável geomorfométrica declividade.



Por meio dos coeficientes de regressão, Tabela 9, foi elaborada a equação de distribuição de solos no Distrito Federal (Eq. 2) e que possibilitou elaborar o mapa de solos (Figura 14). O modelo apresentou coeficiente de correlação 0,975.

$$\text{Classes solos} = 0,945 * (\text{Declividade}) + 0,619 * (\text{Litologia}) + 0,092 * (\text{Altitude}) \quad (2)$$

Ao estabelecer uma relação visual entre o mapa produzido pela equação 2 (Figura 19) e o mapa original de solos (Figura 20), observa-se certa semelhança, que não pode ser mensurada somente pelo critério visual, porém, por essa semelhança, podemos afirmar que o método se adequou na predição das classes de solo.

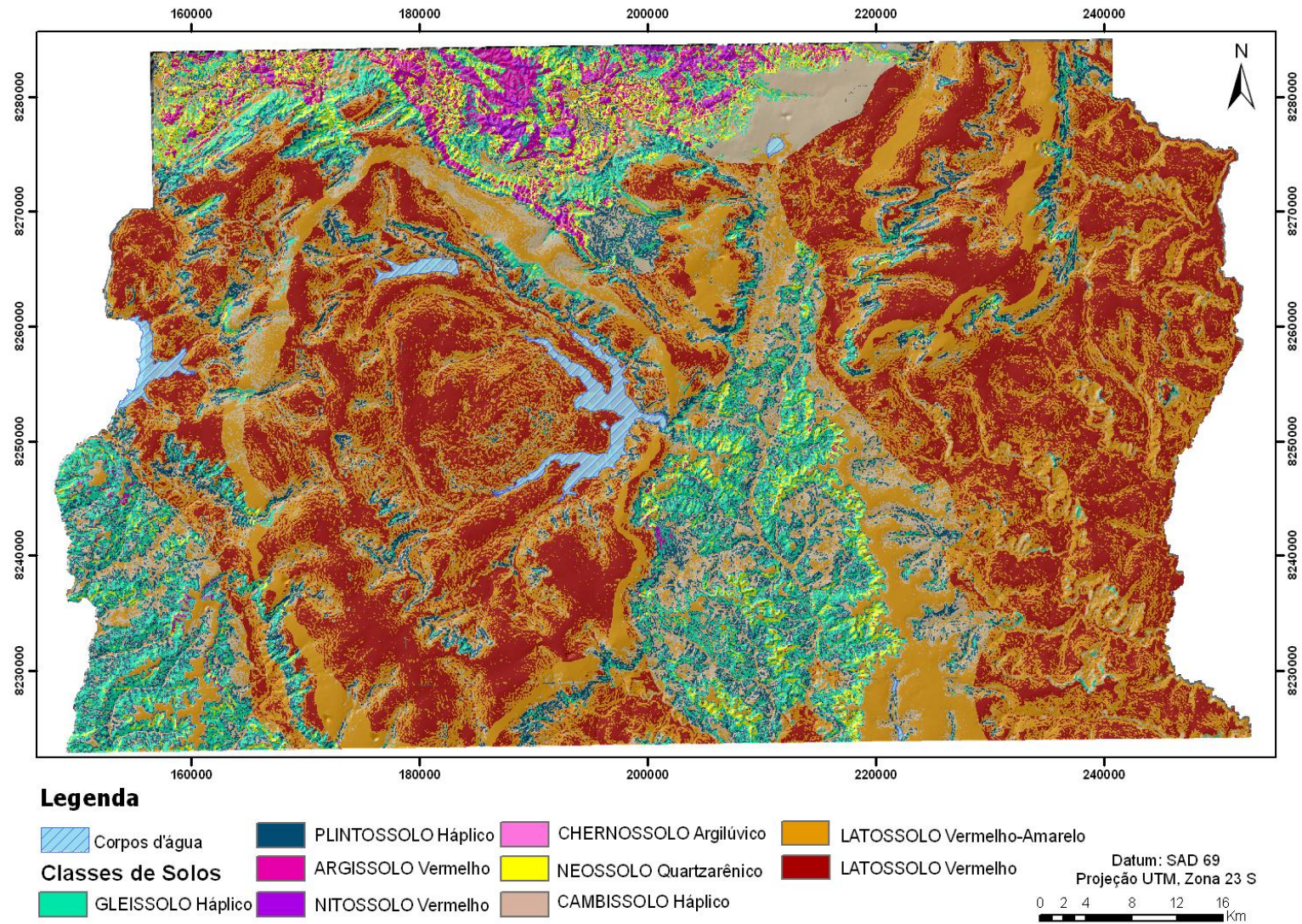


Figura 19. Mapa de solos gerado por meio da equação 2.

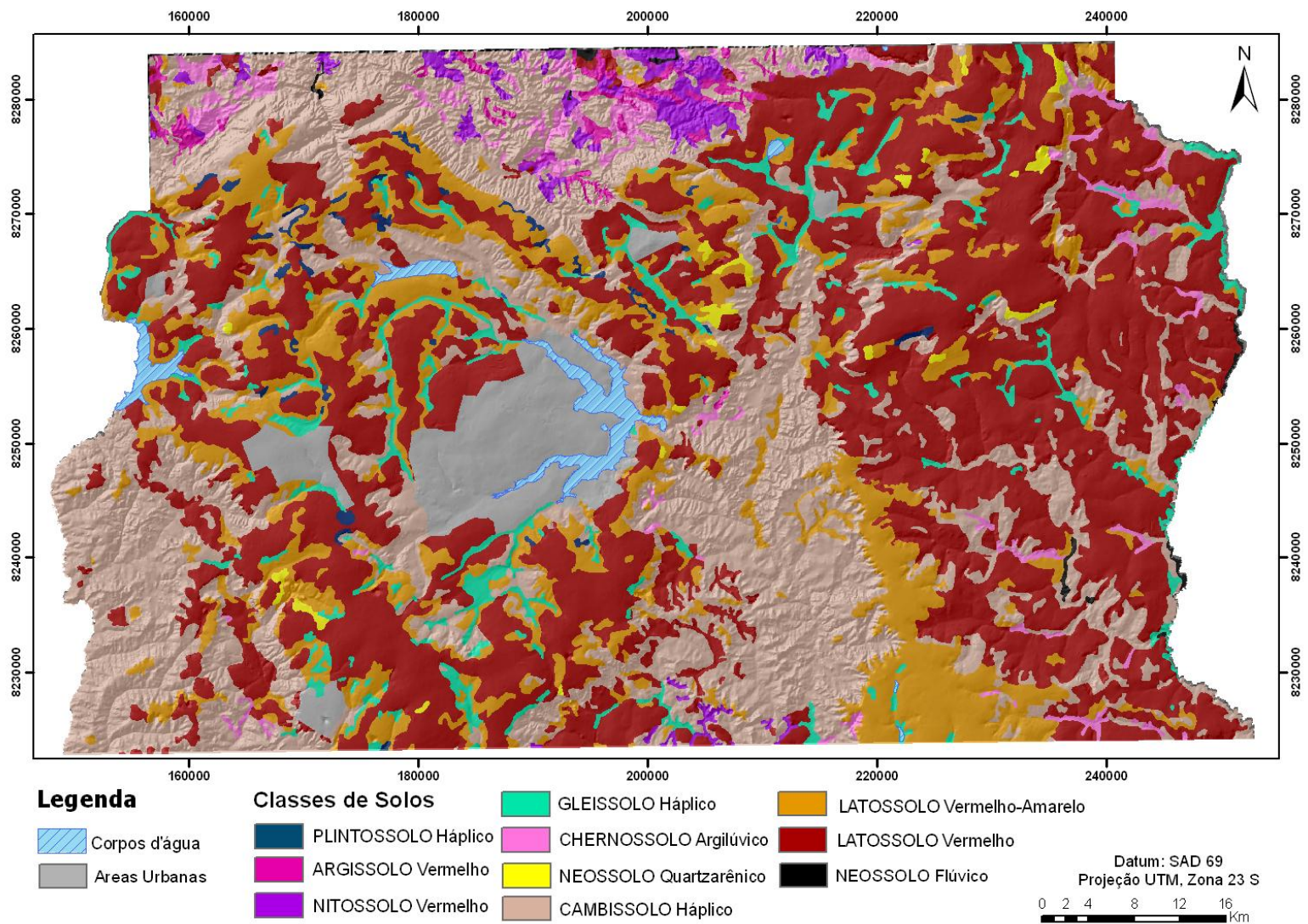
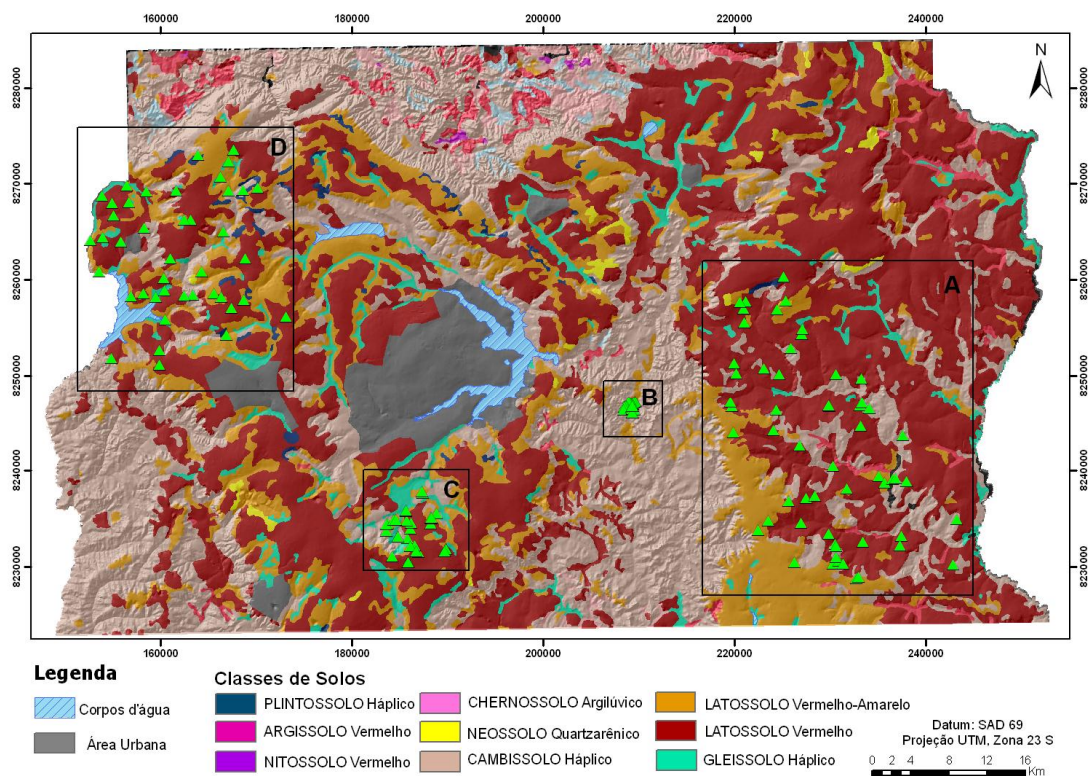


Figura 20. Mapa de solos original com legenda simplificada (Fonte: Embrapa, 1978).

A localização dos perfis de solos utilizados na validação do mapa de solos gerado por meio da equação 2, pode ser observada na Figura 21.

Os resultados da validação serão apresentados separadamente para as áreas A, B, C e D.



**Figura 21.** Mapa localização dos perfis de solos utilizado para validação do mapa gerado por meio da equação 2.

### Área A ó Bacia do Rio Jardim

O resultado da validação na bacia do Rio Jardim pode ser observado na Tabela 10.

**Tabela 10.** Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na bacia do Rio Jardim.

Mapa Original	Mapa Predito						AU%
	RQ	HX	CX	LVA	LV	Total	
RQ	0	0	0	0	0	0	*
HX	0	0	6	3	1	10	*
CX	2	0	11	2	4	19	10,53
LVA	1	0	1	5	0	7	14,29
LV	0	0	0	0	0	0	*
Total	3	0	18	10	5	36	
AP %	*	*	61,11	50,00	*		
<b>AG % 44,44</b>							
<b>Kappa % 31,56</b>							

\* classe não ocorrente no mapa produzido.

Verificou-se que a acurácia global (AG) apresentou resultado satisfatório 44,44% e o índice Kappa 31,56%. Os melhores resultados foram obtidos com as classes Cambissolo e Latossolo Vermelho-Amarelo, que apresentou AP 61,11% e 50,00% respectivamente (Tabela 10).

Para melhorar a capacidade dos modelos em prever os solos Bailey *et al.* (2003) sugerem que se desconsidere as classes com área menor do que 5% da área total.

Coelho (2010) utilizou método de Bayes para mapeamento digital de solos no Rio Grande do Sul e verificou que o método apresentou AG de 66,56% e índice Kappa de 35,85%; a classe com maior acurácia foi a LV com AU 74,04 % e AP 86,19%.

### Área B ó Bacia do Rio São Bartolomeu

De acordo com a Tabela 11, as classes de solos Cambissolo e Latossolo Vermelho-Amarelo também apresentaram os melhores resultados, AP 61,11% e 44,44%, resultado esse, similar com o encontrado na área A. Apresentou AU 58,89% para a classe Cambissolo e 16,67% para Latossolo Vermelho-Amarelo. A AG obtida foi 42,86% e o índice Kappa 29,36%.

**Tabela 11.** Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na bacia do Rio São Bartolomeu.

Mapa Original	Mapa Predito						AU%
	RQ	HX	CX	LVA	LV	Total	
RQ	0	0	0	0	0	0	*
HX	0	0	6	3	1	10	*
CX	2	0	11	2	4	19	<b>58,89</b>
LVA	1	0	1	4	0	6	<b>16,67</b>
LV	0	0	0	0	0	0	-
Total	3	0	18	9	5	35	
AP %	*	*	<b>61,11</b>	<b>44,44</b>	*		
<b>AG % 42,86</b>							
<b>Kappa % 29,36</b>							

\* classe não ocorrente no mapa produzido.

Hengl *et al.* (2002) observaram em seu estudo AG 45,3% e índice Kappa 42,6% quando avaliaram a área toda do mapa. Ao dividirem a área de estudo em montanhosa e plana, os autores verificaram valores de AG 58,1%, índice Kappa 51,6% para área montanhosa e AG 39,1% e índice Kappa 34,4% para área plana. Valores esses compatíveis

com os observados na área B ó Bacia do Rio Bartolomeu, que é uma porção da paisagem do DF um pouco mais acidentada.

De acordo com Caten *et al.* (2009) observou em seu estudo um valor de índice kappa de 48,53% ficou dez pontos percentuais a baixo da área de onde foram utilizados pontos para o modelo.

### Área C ó Bacia do Rio Descoberto

De acordo com a Tabela 12, obteve-se AG 35,14% e índice Kappa 24,43%. A AP para o Latossolo Vermelho foi o mais alto observado nas quatro áreas validadas, 60,00%.

**Tabela 12.** Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na bacia do Rio Descoberto.

Mapa Original	Mapa Predito						AU%
	RQ	HX	CX	LVA	LV	Total	
RQ	0	0	0	0	0	0	*
HX	0	0	0	3	0	3	*
CX	0	0	1	1	0	2	<b>50,00</b>
LVA	3	0	3	6	4	16	<b>37,50</b>
LV	1	3	0	6	6	16	<b>37,50</b>
Total	4	3	4	16	10	37	
AP %	*	*	<b>25,00</b>	<b>6,01</b>	<b>60,00</b>		
<b>AG % 35,14</b>							
<b>Kappa % 24,43</b>							

\* classe não ocorrente no mapa produzido.

Bui *et al.* (1999) obtiveram coeficiente de incerteza para o mapa predito de 48% e concordância entre mapa predito e original de 69 %. O coeficiente Kappa para as classes individuais variou de 23 a 89%, enquanto que o índice Kappa geral do mapa foi 64%.

### Área D ó Fazenda Água Limpa

De acordo com a Tabela 13 o índice Kappa foi 25,24% e a AG 36,36%. O maior valor de AP 77,78% foi observado na classe Latossolo Vermelho-Amarelo.

Coelho (2010) também utilizou o método regressão logística múltipla multinomial e verificou AG de 67,01% e índice Kappa de 32,81%; a classe com maior acurácia foi a classe Latossolo Vermelho, com 71,54% de AU, valor este compatível com o observado no presente estudo.

**Tabela 13.** Acurácia do mapeador (AP) e acurácia do usuário (AU) do mapa estimado, na Fazenda Água Limpa.

Mapa Original	Mapa Predito						Total	AU%
	RQ	GM	HX	CX	LVA	LV		
RQ	0	0	0	0	0	0	0	*
GM	0	0	0	0	0	0	0	*
HX	0	0	0	1	0	0	1	*
CX	0	2	0	0	1	1	4	*
LVA	0	1	1	0	7	2	11	<b>63,64</b>
LV	1	1	0	9	1	5	17	<b>29,41</b>
Total	1	4	1	10	9	8	33	
AP %	*	*	*	*	<b>77,78</b>	<b>62,50</b>		
<b>AG % 36,36</b>								
<b>Kappa % 25,24</b>								

\* classe não ocorrente no mapa produzido.

Entretanto, Crivelenti *et al.* (2009), utilizou árvores de decisão no mapeamento digital de solos em São Paulo e observou coeficiente Kappa obtido no mapa da folha Dois Córregos, 43%. Cabe destacar que a área de estudo dos autores, possui um relevo mais acidentado, se comparado com a área D ó Fazenda Água Limpa, o que pode ocasionar uma menor concordância, conforme descrito por Hengl & Rossiter (2003).

Verificou-se que as classes de solos predominantes nas áreas avaliadas, foram as que apresentaram maior AP, sendo elas Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho e Cambissolo.

De acordo com Hengl *et al.* (2002), um modelo considerado ótimo deveria apresentar uma boa correspondência com a realidade, o que seria representado por uma AG igual a 80% e um índice Kappa igual a 70%. Entretanto, até o presente momento, tais valores não foram satisfatoriamente alcançados na literatura por meio de mapeamentos digitais de solos quando se compara ao mapa de solos pré-existente, obtido pela metodologia tradicional.

Diversas podem ser as razões para a obtenção desses valores de acurácia, são eles: (a) simplificação da legenda original do mapa, o que reuniu em um mesmo solo domínios de relevos distintos; (b) baixa associação dos parâmetros escolhidos, particularmente os de relevo, com os solos; (c) problemas de precisão cartográfica ou exatidão taxonômica; ou mesmo (d) problemas de precisão ou de exatidão na base de dados de relevo, (e) limitações do modelo.

O objetivo principal de qualquer processo classificatório é a redução do número de dados através de sua reunião. Quase todos os levantamentos de solo são acompanhados por agrupamentos em classes. Uma vez que a variação do solo é muito mais contínua que

discreta, classificações numéricas demonstram essa fragilidade dos levantamentos tradicionais. Apesar da aplicação de representações contínuas à ciência do solo, Odeh *et al.* (1992) afirmam que os resultados continuam sendo interpretados como classes descontínuas. Burrough e McDonnell (1998) apontam como problemas a falta de coerência entre as classes mapeadas e que os métodos de classificação numérica são baseados em interrelações lineares. McBratney e Odeh (1997) observaram avanços nesses estudos com a adoção de conjuntos fuzzy, otimizando assim a qualidade de predição na classificação resultante.

## **5.6 - Conclusões**

A utilização dos atributos do terreno variáveis declividade, altitude e litologia em uma abordagem regressão linear múltipla, obteve resultados satisfatórios no mapeamento de solos no Distrito Federal.

Verificou-se que o modelo de regressão linear apresentou desempenho satisfatório para mapeamento das classes de solos, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo, no Distrito Federal.

As possíveis causas de divergências entre os pontos de referência e o mapa de solo digital podem estar relacionadas à escala do mapa geológico utilizado, à limitação do modelo utilizado e às deficiências das variáveis ambientais do SRTM/Topodata em representar todas as variações das características das classes de solos.



## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES FINAIS**

- Após análise da qualidade dos MDEs verificou-se que o MDE gerado por meio de carta apresentou qualidade superior comparado com o MDE SRMT/Topodata, indicando ser o mais adequado para uso na área de estudo.

- Devido à extensão do território brasileiro sob carência de mapeamentos de solos, devem-se considerar as facilidades atuais da disponibilidade dos modelos digitais de elevação como o SRTM/Topodata, que atualmente é de livre acesso e cobre todo o território nacional, o que pode auxiliar em mapeamentos de solos em outras regiões do Brasil.

- Verificou-se que o modelo digital de elevação obtido por meio de carta obteve melhor desempenho no mapeamento digital de solos por meio de regressão linear múltipla, em áreas menores, como a bacia do Ribeirão do Gama.

- As variáveis declividade e geomorfologia apresentaram coeficientes significantes no modelo de regressão linear múltipla aplicado em uma área menor.

- Verificou-se que a aplicação do modelo de regressão linear múltipla pode permitir mapear solos em áreas urbanizadas.

- A utilização dos atributos do terreno, advindos do Modelo Digital de Elevação SRTM/Topodata, tais como as variáveis declividade, altitude e litologia em uma abordagem regressão linear múltipla, obteve resultados satisfatórios no mapeamento de solos no Distrito Federal.

- Verificou-se que o modelo de regressão linear apresentou desempenho satisfatório para mapeamento das classes de solos, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo, no Distrito Federal.

- As possíveis causas de divergências entre os pontos de referência e o mapa de solo digital podem estar relacionadas à escala do mapa geológico utilizado, à limitação do modelo utilizado e às deficiências das variáveis ambientais do SRTM/Topodata em representar todas as variações das características das classes de solos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, H.; ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. J. C. RESENDE, R. J. T. P. ESTEVES, D. R. BRASIL, J. K & ROSA, E. R. (1998) Diagnóstico ambiental do município de Lavras com base de dados georreferenciados do meio físico - IV: Principais grupamentos de solos. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 27. Poços de Caldas, v. 4, p. 442-443.
- ARROUAYS, D.; DESLAIS, W. & BADEAU, V. (2001) The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. **Soil Use and Management**. v.17, 7-11.
- ASADI, H. H. & HALE, M. (2001) A predictive GIS model for potential mapping of gold and base metal mineralization in Takab area, Iran. **Computers & Geosciences**, v. 27, p. 901-912.
- ATKINSON, P. M. & TATNALL, A. R. L. (1997) Neural networks in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.699-709.
- BAILEY, N.; CLEMENTS, T.; LEE, J. T.; THOMPSON, S. (2003) Modelling soil series data to facilitate targeted habitat restoration: a polytomous logistic regression approach. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 67, p. 395-407.
- BARBOSA, I (2007). **Distribuição dos solos nas chapadas elevadas do Distrito Federal, com emprego de geoprocessamento**. Brasília: Faculdade de Agronomia e medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2007, 106 p. Dissertação de Mestrado.
- BERNARDES, T. (2006) **Caracterização do ambiente agrícola do complexo Serra Negra por meio de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica**. Lavras: Universidade Federal de Lavras. 119p. Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas.
- BERRY, P. A. M.; GARLICK, J. D.; SMITH, R. G. (2007) Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. **Remote Sensing of Environment**, v.106, n.1, p.17-27.
- BIRKELAND, P. W. (1984) **Soils and geomorphology**. New York: Oxford University Press. 430 p.
- BISHOP, T. F. A. & McBRATNEY, A. B. (2001) A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. **Geoderma**, Amsterdam, v.103, p.149-160.
- BITTENCOURT, G. (1998) **Inteligência artificial ó Ferramentas e Teorias**. Florianópolis: UFSC. 400p.
- BOCKHEIM, J.G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R.D. & TANDARICH, J. P. (2005) Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, p. 23636
- BÖHNER, J., SELIGE, T. & RINGELER, A. (2006) Image Segmentation using Representativeness Analysis and Region Growing. *ó In: Böhner, J., McCloy, K. R., Strobl, J. (Eds.). SAGA ó Analyses and Modelling Applications*. Göttinger Geogr. Abh. 115: p. 29-38.
- BOLENEUS, D. E.; RAINES, G. L.; CAUSEY, J. D.; BOOKSTROM, A. A.; FROST, T. P. & HYNDMAN, P. C. (2001) **Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State using weights-of-evidence GIS modeling**. Washington, D. C.: United States Geological Survey,. p. 501, 502.

- BONHAM-CARTER, G. F.; AGTERBERG, F. P. & WRIGHT, D. F. (1989) Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential. *In*: AGTERBERG, F. P. & BONHAM-CARTER, G. F. **Statistical Applications in the Earth Sciences**. Ottawa: Geological Survey of Canada, p. 171-183.
- BOURENNANE, H.; KING D.; COUTURIER A. (2000) Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. **Geoderma**, Amsterdam. v.97, p.255-271.
- BRAUN, O.P.G. (1971) Contribuição a geomorfologia do Brasil central. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 3., p. 3-39, out./dez 1971.
- BRAZDIL, P. (1999) **Construção de modelos de decisão a partir de dados**. Disponível em: <http://www.ncc.up.pt/~pbrazdil/Ensino/ML/DecTrees.html>, Acesso em 23 fevereiro de 2008.
- BRIGGS, D. J. & SHISHIRA, E. K. (1985) Soil variability in geomorphologically defined survey units in the Albudeite area of Murcia Province, Spain. *In*: Jungerius, P.D. (ed.). **Soils and geomorphology** (Catena supplement n. 6). Braunschweig: Catena Verlag, cap. 2, p.69-84.
- BUI, E. N.; LOUGHHEAD, A. & CORNER, R. (1999) Extracting soil landscape rules from previous soil surveys. **Australian Journal of Soil Research**, v.37, n.3, p.495-508.
- BURGESS, T. M. & WEBSTER, R. (1980) Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, p. 315-331.
- BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. & McBRATNEY, A. B. (1981) Optimal interpolation and isarithmic mapping, IV. Sampling strategies. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, p. 643-659.
- BURGESS, T. M. & WEBSTER, R. (1984) Optimal sampling strategies for mapping soil types, I. Distribution of boundary spacings. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 641-654.
- BURROUGH, P. A. (1986) **Principles of geographical information systems of land resources assessment**. Francis & Taylor, 185 p.
- BURROUGH, P. A. (1989) Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 477-482.
- BURROUGH, P. A. & Mc DONNELL, R. (1998) Principles of geographical information systems. **Spatial Information Systems and Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 333p.
- CAMPLING, P.; GOBIN, A. & FEYER, J. (2002) Logistic modeling to spatially predict the probability of soil drainage classes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1390-1401.
- CAMPOS, J.E.G. (2004) Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para a Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**. v.34, n.1 p.41-48.
- CAMPOS, P. M. (2009) **Influência físico-hídrica nos atributos diagnósticos em latossolo do Distrito Federal**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária ó Universidade de Brasília, 178 p. Dissertação de Mestrado

- CARRÉ, F.; GIRARD, M. C. (2002) Quantitative mapping of soil types based on regression kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes. **Geoderma**, Amsterdam. v.110, p.241-263, 2002.
- CARVALHO, C. C. N.; FRANCA-ROCHA, W. & SANTO, E. B. E. (2007) Predição de unidades de mapeamento digital de solo usando modelagem sob inferência *fuzzy*: estudo de caso em uma área na região de Mucugê-BA. *In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, p. 305-312.
- CATEN, A. T.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E. & PEREIRA, R. S. (2009) Mapeamento digital de solos através da aplicação de componentes principais em modelos logísticos. *In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, p. 7677-7684.
- CATEN, A. T.; DALMOLIN, R. S. D.; SEBEM, L. F. C. R. & PEREIRA, E. R. S. (2009) Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas. *In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2009, Natal, Anaisí Natal: INPE, CD-ROM.
- CHAGAS, C. S. (2006) **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 223 p. Tese de Doutorado em solos e nutrição de plantas.
- CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F; ROCHA, M. F.; JÚNIOR, W. de C.; NETO, N. C. S. (2010) Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.2, p.2186226.
- CHAPLOT, V.; BERNOUX, M.; WALTER, C.; CURMI P.; HERPIN, U. (2001) Soil carbon storage prediction in temperate hydromorphic soils using a morphologic index and digital elevation model. **Soil Science**, v. 66, p.48660.
- CHATTERJEE, S.; HADI, A. S. & PRICE, B. (2000) **Regression analysis by examples** 3. ed. John Wiley & Sons, Inc.
- CLINE, M. G. (1949) Basic principles of soil classification. **Soil Science**, Baltimore, v. 67, p. 81-91.
- CODEPLAN ó COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. (1984) **Atlas do Distrito Federal**. 1.ed., Brasília: Governo do Distrito Federal. 124p.
- COELHO, F. F. (2009) **Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variáveis geomofométricas e sistemas de informações geográficas**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 286p. Dissertação mestrado.
- CONGALTON, R. G. (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**. v.37 pp.35-46
- CONGALTON, R.; Green, K. (1993) A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v.59 pp.641-644.
- CONRAD, O. (2006) SAGA ó Program structure and current state of implementation. *In: BÖHNER, J., McCLOY, K.R. & Strobl, J. SAGA ó Analysis and Modelling Applications*. Göttinger Geographische Abhandlungen, 115, p. 39-52.
- COSTA, F. H. S. & FILHO, C. R. S. (2009) Aplicação de redes neurais artificiais para reconhecimento de padrões de solos. *In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, p. 5177 ó 5183.

- CRIVELENTI, R. C.; COELHO, R. M.; ADAMI, S. F. & OLIVEIRA, S. R. M. (2009) Mineração de dados aplicada ao mapeamento digital de solos: folha Dois Córregos. *In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*. Fortaleza.
- CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G.T. & LEPSCH, I.F. (2005) Superfícies geomórficas e atributos de latossolos em uma seqüência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira Ciência do Solo**. v.29, p. 81-90.
- DE GRUIJTER, J. J. & McBRATNEY, A. B. A (1988) modified fuzzy k-means method for predictive classification. *In: BOCK, H. H. (Ed.). Classification and related methods of data analysis*. Elsevier: Amsterdam, p. 97-104.
- DEBELLA-GILO, M.; ETZELMULLER, B. & KLAKEGG, O. (2007) Digital Soil Mapping Using Digital Terrain Analysis and Statistical Modeling Integrated into GIS: Examples from Vestfold County of Norway Proceedings, **ScanGIS**.
- DENT, D.; YOUNG, A. (1981) **Soil Survey and Land Evaluation**. London: George Allen & Unwin (Ed.), 278 p.
- DIKAU, R. (1989) The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. *In: RAPER, J. (Ed.). Three dimensional applications in geographic information systems*. New York: Taylor e Francis, p. 51-77.
- DOBOS, E.; MICHELI, E.; BAUMGARDNER, M. F.; BIEHL, L. & HELT, T. (2000) Use of combined digital elevation model and satellite data for regional soil mapping. **Geoderma**, v.97, p.367-391.
- DOKUCHAEV, V.V. (1883) **Russian Chernozem**. *In: KANER, N., Traduction, Israel Prog. for Sci. Trans., Jerusalem*. 162p.
- EMBRAPA ó EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (1978) Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal, **Boletim Técnico**, n. 53, SNLCS, Rio de Janeiro, 455 p.
- EMBRAPA ó EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (1995) **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro, 101p.
- EMBRAPA ó EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (2006) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**, 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 316p.
- EMBRAPA ó EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (2004) **Mapa Pedológico Digital ó SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo**. Documentos 120. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados.
- FALORNI, G.; TELES, V.; VIVONI, E. R.; BRAS, R. L. & AMARATUNGA, K. S. (2005) Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.110, n.F2, p.1-20.
- FERRANTE, J. E. T. & NETTO, P. B. (2000) Hidrografia. *In: FONSECA, F. O. Olhares sobre o lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos.
- FIDÊNCIO, P. H.; POPPI, R. J. & DE ANDRADE, J. C. (2002) Determination of organic matter in soils using radial basis function networks and near infrared spectroscopy. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 453, p. 125-134.
- FIGUEIREDO, S. R. (2006) **Mapeamento supervisionado de solos através do uso de regressões logísticas múltiplas e sistema de informações geográficas**. Porto Alegre:

- Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. UFRS, 93 p, Dissertação de Mestrado.
- FLORENZANO, T. G. (2008) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Editora: Oficina de Textos. 320p. ISBN: 9788586238659
- FLORINSKY, I. V. & KURYAKOVA, G. A. (1996) Influence of topography on some vegetation cover properties. **Catena**, v. 27, p. 123-141.
- FLORINSKY, I.V.; EILERS, R.G.; MANNING, G. & FULLER, L.G. (2002) Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environ. Modeling Software*, 17:295-311.
- FONSECA, L. M. G. (2000) **Processamento digital de imagens**. INPE ó Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.105p.
- FREDRICK, K. C.; BECKER, M. W.; MATOTT, L. S.; DAW, A.; BANDILLA, K.; FLEWELLING, D. M. (2007) Development of a numerical groundwater flow model using SRTM elevations. **Hydrogeology Journal**, v.15, n.1, p.171-181.
- FREITAS-SILVA F.H. & DARDENNE M.A. (1994) Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. *In: Simpósio de Geologia do Centro Oeste*. Anais. Brasília, SBG-DF/CO, p.164-165.
- FREITAS-SILVA F. H. & CAMPOS J. E. G. (1998) Geologia do Distrito Federal. *In: IEMA/SEMATEC/UnB 1998. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. Brasília: IEMA/ SEMATEC/UnB. Vol. 1, Parte I. 86p.
- GALLANT, J. C. & WILSON, J. P. (2000) Primary topographic attributes. *In: WILSON, J. P. & GALLANT, J. C. Terrain Analysis: Principles and applications*. New York: John Wiley & Sons, p.51-85.
- GERSTENECKER, C.; LÄUFER, G.L.; STEINECK, D.; TIEDE, C.; WROBEL, B. (2005) Validation of digital elevation models around Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Perugia, v.5, n.6, p.863-876.
- GESSLER, P. E.; CHADWICK, O. A.; CHARMAN, F.; ALTHOUSE, L. & HOLMES, K. O. (2000) Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. **Soil Science Society American Journal**. v.64, p.204662056.
- GOBIN, A.; CAMPLING, P. & FEYEN, J. (2001) Soil-landscape modelling to quantify spatial variability of soil texture. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, p. 41-45.
- GONG, P. & HOWARD, P.J. (1990) The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. **Photogrammetric Engineering and Remote sensing**, v.60, p.331-337.
- HANSSEN, F. R. (2001) **Radar Interferometry**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 308p.
- HANSEN, D. T. (2001) **Describing GIS applications: spatial statistics and weight evidence extension to ArcView in the analysis of the distribution archaeology sites in Landscape**. *In: GISCAFE*. Disponível em: <http://www.giscafe.com/TechPapers/Papers/paper054/>. Acesso em: 11 de julho 2009.
- HECHT-NIELSEN, R. (1990). **Neurocomputing**. Addison-Wesley Publishing Company, New York.

- HENGL, T. (2003) **Pedometric mapping: bringing the gaps between conventional and pedometric approaches**. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 214 p.
- HENGL, T.; ROSSITER, D. G. & HUSNJAK, S. (2002) Mapping soil properties from an existing national soil data set using freely available ancillary data. *In: World Congress of Soil Science*, 17, Bangkok, Tailândia, 14-21.
- HENGL, T.; TOOMANIAN, N.; REUTER, H. I.; MALAKOUTI, M. J. (2007) Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. *Geoderma*, Amsterdam. v.140, n.4, p. 417-427.
- HOLSHEIMER, M. & SIEBES, A. (1994) **Data Mining: the search for knowledge in databases**. Amsterdam ó Holanda: Relatório CS-R9406. ISSN 0169-118X.
- HOSMER, D. W. & LEMESHOW, S. (1989) **Applied logistic regression**. New York: Wiley: New York, USA.
- HUDSON, B.D. (1992) The soil survey as paradigm-based science. *Soil Science Society of America Journal*. v.56, p. 836ó 841.
- HUTCHINSON, M. F. & GALLANT, J. C. (2000) Digital elevation models and representation of terrain shape. *In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (ed.). Terrain analysis: Principles and applications*. New York: John Wiley & Sons, 2000. p.29-50.
- IBAÑEZ, J. J.; ZINCK, J. A. & JIMÉNEZ-BALLESTA, R. (1993) Soil Science Survey: old and new challenges. *In: ZINCK, J. A. In: Soil survey: perspectives and strategies for 21st century*. ITC Publication, Enschede, The Netherlands, n.21, p.7-14.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2007) **Manual Técnico de Pedologia do Brasil**.
- INGARGIOLA, G. (1996) **Building Classification Models: ID3 and C4.5**. Disponível em: <http://www.cis.temple.edu/~ingargio/cis587/readings/id3-c45.html>, Acesso em: 15 de agosto de 2011.
- IPPOLITI, R. G. A.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FILHO, E.I.F.; GAGGERO, M. R. & SOUZA, E. (2005) Análise digital de terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de ômar de morrosô (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 2, p. 269-276.
- ITO, Y.; HOSOKAMA, M.; LEE, H. & LIU, J. G. (2000) Extraction of damaged regions using SAR data and neural networks. Amsterdam: International **Archives of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v.33, part B1, p. 156-163.
- JARVIS, A., RUBIANO, J., NELSON, A., FARROW, A. & MULLIGAN, M. (2004) **Practical A.O.T. Use of SRTM data in the tropics: comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Cali, CO: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- JENNY, H. (1941) **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York, London: McGraw-Hill, 324 p.
- JOHNSTONE, S. (2003) **Past and Prediction: Archaeology and ArcGis in Cultural Resource Management**. *In: GISCAFE*, Disponível em: <http://www10.giscale.com/goto.php>. Acesso em: 19 de dezembro de 2008.
- KATINSKY, M. (1994) **Fuzzy set modelling in Geographical Information Systems**. Madsin Wisconsin ó USA: University of Wisconsin. Dissertação de Mestrado.

- KEMP, L. D.; BONHAM-CARTER, G. F. & RAINES, G. L. (1999) **Arc-WofE:Arcview extension for eight-of-evidence mapping**. Geological Survey of Canada, United States of Geological Survey. User Guide, 76 pp, Disponível em: <http://gis.nrcan.gc.ca/software/arcview/wofe>, Acesso em: 08 de setembro de 2009.
- KEY, J.; MASLANIK, J. A. & SCHWEIGER, A. J. (1989) Classification of merged AVHRR and SMMR artice data with neural networks. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.55, p.1331-1338.
- KLINGEBIEL, A. A.; HORVARTH, E. H.; MOORE, D. G. & REYBOLD, W. U. (1987) Use of slope, aspect, and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil surveys. Madison: **Soil Science Society of America**.
- KOÇAK, G.; BÜYÜKSALIH, G. & JACOBSEN, K. (2004) Analysis of digital elevation models determined by high resolution space images. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.35, p.636-641.
- KOÇAK, G.; BUYUKSALIH, G. & ORUC, M. (2005) Accuracy assessment of interferometric digital elevation models derived from the Shuttle Radar Topography Mission X-and C-band data in a test area with rolling topography and moderate forest cover. *Optical Engineering*, Bellingham, v.44, n.3.
- LACERDA, M. P. C. (1999) **Correlação geo-pedológica em solos B texturais na região de Lavras, MG**. Lavras: Faculdade de Engenharia Agrônômica - Universidade Federal de Lavras, 257p. Tese de Doutorado.
- LACERDA, M. P. C., NASCIMENTO, R. O. & BARBOSA, I. O. (2006) Determinação de pedofomas na estação ecológica de Águas Emendadas, Distrito Federal. *In: Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água*, Aracaju, CD-ROM.
- LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O.; MENESES, R. P.; ROSA, J. W. & ROIG, H. L. (2005) Aplicação de geotecnologias em correlações entre solos, geomorfologia, geologia e vegetação nativa no Distrito Federal, DF. *In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, p. 2211-2218.
- LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O.; CAMPOS, P. M. & PAPA, R. A. (2007) Utilização de sensoriamento remoto para o estabelecimento de relações entre vegetação nativa e classes de solos em mapeamento pedológico, Distrito Federal. *In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 3991-3996.
- LACERDA, M. P. C.; QUEMÉNÉUR, J. J. G.; ANDRADE, H.; ALVES, H. M. R. & VIEIRA, T. G. C. (2008) Estudo da relação pedomorfogeológica na distribuição de solos com horizontes B textural e B nítico na paisagem de Lavras (MG) **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:271-284.
- LAGACHERIE, P. & VOLTZ, M. (2000) Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. **Geoderma**, Amsterdam, v.97, p. 187-208.
- LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A. B. & VOLTZ, M. (2007) **Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective**. Elsevier, Chapter 32. Pp. 437-454.
- LAGACHERIE, P. & McBRATNEY, A. B. (2007) Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *In: Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. Montpellier and Sydney, p. 1-3.
- LANDIM, P. M. B. (2003) **Análise estatística de dados geológicos**. 2a. edição revista e ampliada. 2. ed. São Paulo/SP: Fundação Editora da UNESP/FEU. 253 p.



- LARK, R. M. & BECKETT, P. H. T. (1998) A Geostatistical descriptor of the spatial distribution of soil classes, and its use in predicting the purity of possible soil map units. **Geoderma**, Amsterdam, vol. 83, n. 3-4, p. 243-267.
- LEE, W; BOHRA, N. C.; ALTSCHAEFFL, A. G. & WHITE T. D. (1998) Resilient modulus of cohesive soils. ASCE. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 2, p. 131-136,
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (1994) **Remote sensing and image interpretation**. 2.ed. Chichester: John Wiley & Sons. 750p.
- LUEDELING, E.; SIEBERT, S.; BUERKERT, A. (2007) Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN-based delta surface approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.62, n.4, p.283-294.
- MARTINS, E. S. (1998) Sistemas pedológicos do Distrito Federal. In: **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, Brasília : SEMATEC: IEMA: MMA-SRH, CD-ROM. v. 1, p. 139-163.
- MARTINS, E. S. & BAPTISTA, G. M. M. (1998) Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: CAMPOS, J.E.G; FREITAS-SILVA F.H (Coord.). **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal**.
- MATHERON, G. (1965) **Les variables regionalisées et leur estimation**. Masson, Paris. 1 v.
- McBRATNEY, A. B. & WEBSTER, R. (1981) Spatial dependence and classification of the soil along a transect in northeast Scotland. **Geoderma**, Geoderma, v.26, p. 63-82.
- McBRATNEY, A. B.; DE GRUIJTER, J. J. (1992) A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 43, n. 1, p. 159-175.
- McBRATNEY, A. B., ODEH, I. O. A. (1997) Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. **Geoderma**, v.77, p. 85-113.
- McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S. & SHATAR, T. M. (2000) An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3-4, p. 293-327.
- McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. (2003) On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, p. 3-52.
- McCUNE, B. & KEON, D. (2002) Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. **Journal of Vegetation Science**, n. 13, p. 603-606.
- McKENZIE, N. J. & RYAN, P. J. (1999) Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, Amsterdam, v.89, p.67-94.
- MENDONÇA-SANTOS, M. L. & SANTOS, H. G. (2003) **Mapeamento digital de classes e atributos de solos: métodos, paradigmas e novas técnicas**. EMBRAPA ó Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro, Documentos 55, 19p.
- MONTGOMERY, D. R. (2003) Predicting landscape-scale erosion using digital elevation models. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 335, p. 1121-1130.

- MOORE, I.D.; GRAYSON, R. B. & LADSON, A. R. (1991) Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, geomorphological, and biological applications, **Hydrological Processes**. v. 5. Issue 1, pp 3-30.
- MOORE, I. D.; TURNER, A. K.; WILSON, J. P.; JENSON, S. K. & BAND, L. E. (1993a) GIS and land-surface subsurface process modeling. *In: Environmental Modeling with GIS*. Oxford, New York, pp. 196- 230.
- MOORE, I. D.; LEWIS, A. & GALLANT, J. C. (1993b) Terrain attributes: Estimation methods and scale effects. *In: Modelling Change in Environmental Systems*. *In: JAKEMAN, A. J.; Beck, M. B. & McALEER, M.* chapter 8. John Wiley and Sons Ltd.
- MOORE, I. D., GESSLER, P. E. & NIELSON, G. A. (1993c) Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society American Journal*. v.57, p.443-452.
- MOREIRA SILVA, A. (1999) **Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se de uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero**. Brasília: Instituto de Geociências ó IG, Universidade de Brasília. 195 p. Tese de Doutorado em Geologia.
- MOREIRA, F. R. S.; ALMEIDA FILHO, R. A. & CÂMARA, G. (2003) Modelamento de dados geológicos em pesquisa mineral segundo o teorema de Bayes. *In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Belo Horizonte.
- MOREIRA, M. A. (2003) **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. Viçosa: 2. ed., editora UFV.
- MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO J. W. & BLANCANEAU, P. (2002) Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, pp.869-878.
- NANNI, M. R.; ROCHA, H. O. (1997) Integration of GIS technology, remote sensing and multivariate analysis in the delimitation of physiographic units for pedological mapping. **Boletim do Instituto de Geociências - Série Científica**, n. 28, p.129-143.
- NOVAES PINTO, M. & CARNEIRO, P. J. R. (1984) Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal, *In: IV Congresso Brasileiro de Geógrafos*, 1984, São Paulo, Anais... São Paulo:SBG, 1984.Impresso.
- NOVAES PINTO M. (1986) Unidades Geomorfológicas do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 11, n.21, p. 97-109.
- NOVAES PINTO M. (1987) Superfícies de Aplainamento do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 49, p. 9-27.
- NOVAES PINTO M. (1994a) Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. *In: M. Novaes Pinto (org.) Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília. Editora UnB. 2a ed. p. 285-320.
- NOVAES PINTO, M. (1994b) Paisagens do cerrado no Distrito Federal. *In: M. Novaes Pinto (org.) Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília. Editora UnB. 2a ed. p. 511-542.
- ODEH, I. O. A.; McBRATNEY, A. B. & CHITTLEBOROUGH, D. J. (1990) Design of optimal sample spacings for mapping soil using fuzzy-k-means and regionalized variable theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 47, p. 93-122.

- ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J. & McBRATNEY, A. B. (1991) Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 49, p. 1- 32.
- ODEH, I. O. A. & McBRATNEY, A.B. (2000) Using AVHRR images for spatial prediction of clay content in the lower Namoi valley of eastern Australia. **Geoderma**, Amsterdam 237-254.
- ODEH, I. O. A, CRAWFORD, M. & McBRATNEY A. B. (2007) Digital mapping of soil attributes for regional and catchment modelling, using ancillary covariates, statistical and geostatistical techniques. In: LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A. B. & VOLTZ, M. (2007) **Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective**. Elsevier, Chapter 32. Pp. 437-454.
- OLIVEIRA, I. C. S.; LACERDA, M. P. C.; FERREIRA, C. S.; BARBOSA I. O.; FRANCA, L. V.; MENEGHIN, M. F. S. & BILICH, M. R. (2005) Levantamento detalhado dos solos da microbacia do Córrego da Onça e do Córrego Taquara, Fazenda Água Limpa (FAL), DF. In: **XXX Congresso Brasileiro de Ciência do solo**. Recife, PE : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. CD-ROM. p. 1-4.
- PARK, S. J. & BURT, T.P. (2002) Identification and characterization of pedogeomorphological processes on a hillslope. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.66, n.6, p.1897-1910.
- QUINLAN, J. R. (1986) Induction of decision trees. **Machine Learning**, Boston, v. 1, p 81-106.
- RAINES, G. L. (1999) Evaluation of Weights of Evidence to Predict Epithermal-Gold Deposits in the Great Basin of the United States. **Natural Resources Research**. v.8 n.4: pp.257-276.
- RANZANI, G. (1969) **Manual de levantamentos de solos**, 2º edição, Ed. Edgard Bücher.
- REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA S. T.; CHAGAS, C. S.; MARTINS, E. S.; ANDAHUR, J. P.; GODOY M. J. S. & ASSAD, M. L. C. L. (2000) **Levantamento semidetalhado dos solos da Bacia do RIO JARDIM-DF, escala 1:50.000**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa - Embrapa Cerrados Planaltina n. 18 p.1-63, setembro 2000, ISSN 1518-0417
- REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. S. (2008) **Solos do Bioma Cerrado : aspectos pedológicos**. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P.; RIBEIRO, J.F. (Eds.). Cerrado ambiente e flora. Planaltina: Embrapa, 2008, v.2, p. 107 ó 149.
- REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CARDOSO, E. A.; SPERA, S. T.; CARVALHO Jr.; GUIMARÃES, R. F.; SILVA, A. V & FARIAS, M. F. R. (2003b) **Levantamento de solos de alta intensidade do Alto do Curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100.000**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa - Embrapa Cerrados Planaltina, Outubro 2003, ISSN 1679-918X.
- REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CARVALHO Jr.; GUIMARÃES, R. F.; FARIAS, M. F. R. & SILVA, A. V. (2003a) **Caracterização de solos na margem direita do córrego divisa, rios São Bartolomeu, Distrito Federal**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Cerrados, 2003. Apoio. Boletim de pesquisa - Embrapa Cerrados Planaltina, Junho 2003, ISSN 1517-5117.
- RESENDE, M.; CURY, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. (2007) **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5.ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras. 322p.

- RIBEIRO, S. R. A. (2003) **Integração de imagens Landsat TM e dados auxiliares para a delimitação automática de unidades fisionômicas (paisagem) e geológicas usando redes neurais artificiais**. Curitiba, Tese Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 169p.
- ROCHA, C. H. B. (2000) **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed. Do autor, 220p.
- ROJAS, E. H. M. (2004) **Síntese Genética de Redes Neurais Artificiais ART2 na Classificação de Imagens ASTER para Mapeamento de Uso e Cobertura da Terra na Região Norte do Mato Grosso**. São Jose dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, 124 p. 2004. Dissertação de Mestrado.
- ROSA, R. & BRITO, J.L.S. (1996) **Introdução ao Geoprocessamento**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- ROSSITER, D. G. (2004) Technical Note: **Statistical methods for accuracy assessment of classified thematic maps**.
- RUGGIERO, P.G.C.; PIVELLO, V.R.; SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E. & PIRES NETO, A.G. (2006) Relação entre solo, vegetação e topografia em área de cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): como se expressa em mapeamentos? **Acta Botanica Brasilis**, v.20, p.383-394.
- RUSPINI, E. H. (1969) A new approach to clustering. **Information and Control**, New York, v. 15, p. 22-32.
- SANTOS, M. (2002) **A natureza do espaço**. São Paulo: Edusp, 2002.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J.C.; ANJOS, L. H. C. (2005a) **Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo**. 5ª ed. Viçosa, SBCS, 92p.
- SANTOS, R. L.; QUINTANILHA, J. A. & FUKUMORI, I. (2005b) Os solos e o sensoriamento remoto: o uso de imagens Landsat 7 ETM para mapeamento dos horizontes coesos dos Tabuleiros Costeiros da Bahia. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE.
- SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. (2006) Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.58, n.1, p.101-107.
- SCHALKOFF, R. J. (1992) **Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches**. New York: John Wiley & Sons, 384p.
- SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O.A. & MCARTHUR, D. (2003) Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**. v.27, p. 171-197.
- SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S., Mitusov, A. V. (2002) Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, Amsterdam. n. 107, p. 1-32,
- SILVA, A. B. (2003a) **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: Conceitos e fundamentos**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP.
- SILVA, M. T. G. (2003b) **Utilização de geotecnologias no levantamento e adequação do uso dos solos na Bacia do Rio João Leite-Goiânia**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Veterinária ó Universidade de Brasília. 125p. Dissertação de Mestrado em Agronomia.

- SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T. ; MANTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A. & OKAFIORI, C. (2008) Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.9, n.3, p.317-329.
- SKIDMORE, A.K.; TURNER, B.J; BRINKHOF, W.& KNOWLES, E. (1997) Performance of a neural network: mapping forest using GIS and remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol 63, p.p. 501-514,
- SMITH, B. & SANDWELL, D. (2003). Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. **Geophysical Research Letters**, 30(9): 1467-1470.
- THOMPSON, A. L.; GHIDEY, F. & REDMI, T. P. (2001) Raindrop energy effects on chemical and sediment transport. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.44, n.4, p.835-841.
- TOMASELLA, J. & WATERLOO, M. J. (2008) Hand, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.112, n.9, p.3469-3481.
- VALERIANO, M. M. & GARCIA, G. J. (2000) The estimate of topographical variables for soil erosion modelling through geoprocessing. **International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing**. Amsterdam: ISPRS, v.33, part B, p.678-685.
- VALERIANO, M. M. (2003) **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p.
- VALERIANO, M. M. & ABDON, M. M. (2007) Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.59, n.1, p.63-71.
- VALERIANO, M. M. (2008) **TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais** - São José dos Campos: INPE.
- VALERIANO, M. M. & ROSSETTI, D. F. (2011) Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, Sevenoaks, v. 32, p. 300-309, 2011.
- VALADARES, G. S. & PEREIRA, M. G. (2010) Proposta de classificação e mapeamento dos solos do Brasil com base na temperatura do ar, usando interpolação e modelo digital de elevação (SRTM). **Revista de Geografia**, v.27, n.2.
- VENTURIERI, A. & SANTOS, J.R. (1998) Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. In: Assad, E. D; Sano, E. E. **Sistema de informações geográficas. Aplicações na agricultura**. 2 ed., Brasília: Embrapa - SPI/ Embrapa ó CPAC, p.351-371.
- WEBSTER, R. (1984) Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in Soil Science**, New York, v. 3, p. 1-70.
- WILSON, J. P. & GALLANT, J. C. (2000) Digital terrain analysis, chapter 1. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27.
- WISE, S. (2000) Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. **Hydrological Processes**, v.14, p.1909-1929.
- WONG, G. Y. & MASON, W. N. (1985) The hierarchical logistic regression model for multilevel analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v. 80, p. 513-524.

- WOOD, J. D. (1996) **The geomorphological characterisation of digital elevation models.** Leicester ó UK: University of Leicester. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/PhD>, Acessado em 25 de janeiro de 2011. Tese de Doutorado.
- ZADEH, L. A. (1965) Fuzzy sets. **Information and Control**, New York, n. 8, p. 338-353.
- ZEE, (2011) **ZEE ó Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal.** Greentec Consultoria e Planejamento Ltda.
- ZHU, A. X. (1997) A similarity model for representing soil spatial information. **Geoderma**, Amsterdam, v.77, p.217-242.
- ZHU, A. X. (2000) Mapping soil landscape as spatial continua: the neural network approach. **Water Resources Research**, v.36, p.663-677.
- ZHU, A.X ; HUDSON, B; BURT, J.; LUBICH, K. & SIMONSON, D. (2001) Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic. **Soil Science Society of American Journal**. v.65, p. 885-894.
- ZIADAT, F. M. (2005) Analyzing Digital Terrain Attributes to Predict Soil Attributes for a Relatively Large Area. **Soil Science Society American Journal**, v.69, p.1590ó1599.

## **ANEXO I**

# **Digital elevation models obtained by contour lines and SRTM/Topodata, for digital soil mapping**

Marina R. Bilich Neumann<sup>1\*</sup>, Henrique L. Roig<sup>2</sup> & Marilusa P. C. Lacerda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine, University of Brasilia, Brasilia, Brazil

<sup>2</sup>Institute of Geosciences, University of Brasilia, Brasilia, Brazil

In the last decade, the quantitative models for digital mapping of soils have experienced rapidly development of new methods, more efficient and economic. One reason is due, mainly, to the increase of auxiliary information of physical environment, especially the images from remote sensing and terrain attributes derived from digital elevation models. Thus, this study aimed to evaluate the quality of digital elevation models obtained by contour lines and from SRTM/Topodata resample to 30 meters, for digital soil mapping. Both digital elevation models were assessed for vertical quality and the potential to derive terrain attributes, which capture the main processes that occur in the area. To enable comparison, all digital elevation models were generated with a 30 meters spatial resolution. The SRTM/Topodata DEM tends to underestimate elevation in peaks and ridges, and at this fine scale the 1:10,000 cartography contour lines produces a more accurate and more detailed DEM. However, due to the size of Brazil in a lack of soils maps with good scale, the availability and spatial coverage of the SRTM/Topodata make it a desirable option.

**KEY-WORDS:** digital elevation models, digital soil mapping, geographic information system.

<sup>1\*</sup>Corresponding author: E-mail: marinabilich@unb.br, Tel: +55 61 310177122. FAX: +55 61 31077118



## INTRODUCTION

The soils distribution in the landscape, according to Birkeland (1984), reflects the influence of various formation factors and is a combination of microclimatic conditions, pedogenesis, relief and geological processes. The relief forms control this distribution, because their influence to water flow, energy and material redistribution processes on slopes. Also Gobin et al. (2001) argue that the water movement in landscapes is the main responsible process for soil development. Thus, understanding the relief forms, it allows making inferences and predictions about the soil attributes in different landscape segments.

In the last decade, the quantitative modeling on digital soil mapping has experienced a rapid development with new and more economical methods, due mainly to the increase availability of physical environment auxiliary information, especially those from remote sensing images and elevation attributes, derived from digital elevation models (DEMs) (Dobos et al., 2000, McBratney et al., 2000, McBratney et al., 2003 and Hengl, 2003).

The use of digital elevation models (DEMs) for understanding the soils distribution, contributes as an important tool to delineate preliminary soils mapping units, used to support the soil surveys work in the field phase and also support pedological cartography (Nanni et al., 1997 and Hengl, 2003).

The digital relief modeling is one of the best quantitative techniques developed for predicting soil classes and attributes (McKenzie et al., 1999). Different attributes can be derived from a DEM (Wilson et al., 2000) and among these attributes, elevation, slope and orientation, have been recognized as the most effective for surveying soil in medium scale (Chagas, 2006, Campling et al. 2002, Debella-Gilo et al., 2007, Bailey et al., 2003, Figueiredo, 2006). Odeh et al. (1991) found that the slope and curvature explain much of the soil variability.

The DEMs can be obtained in several ways: as a restorer devices from Digital Video Plotter (DVP) that can extract data directly from the three-dimensional aerial photos, optical sensors, image sensors such as ERS and RADARSAT radar, laser altimetry by using airborne sensors (LIDAR) and interpolation of topographic information (Valeriano, 2004).

The SRTM project (Shuttle Radar Topographic Mission) provided three-dimensional models with two quality and spatial resolution of 1 arc sec (~30 meters) and 3 arc sec (~90 meters) with horizontal datum WGS84 and vertical datum WGS84/EGM96 with relative vertical accuracy on the order of 5 meters (Smith et al., 2003).

The Topodata products offers free access to brazilian local geomorphometric variables derived from SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) for the entire national territory. These data were refined from the original spatial resolution of 3 arc sec (~ 90m) to 1 arc sec (~30m) by kriging. Then geomorphometric algorithms analyses were applied on the refined data to calculate the variables as slope, orientation of slopes, horizontal curvature and vertical curvature (Valeriano, 2008).

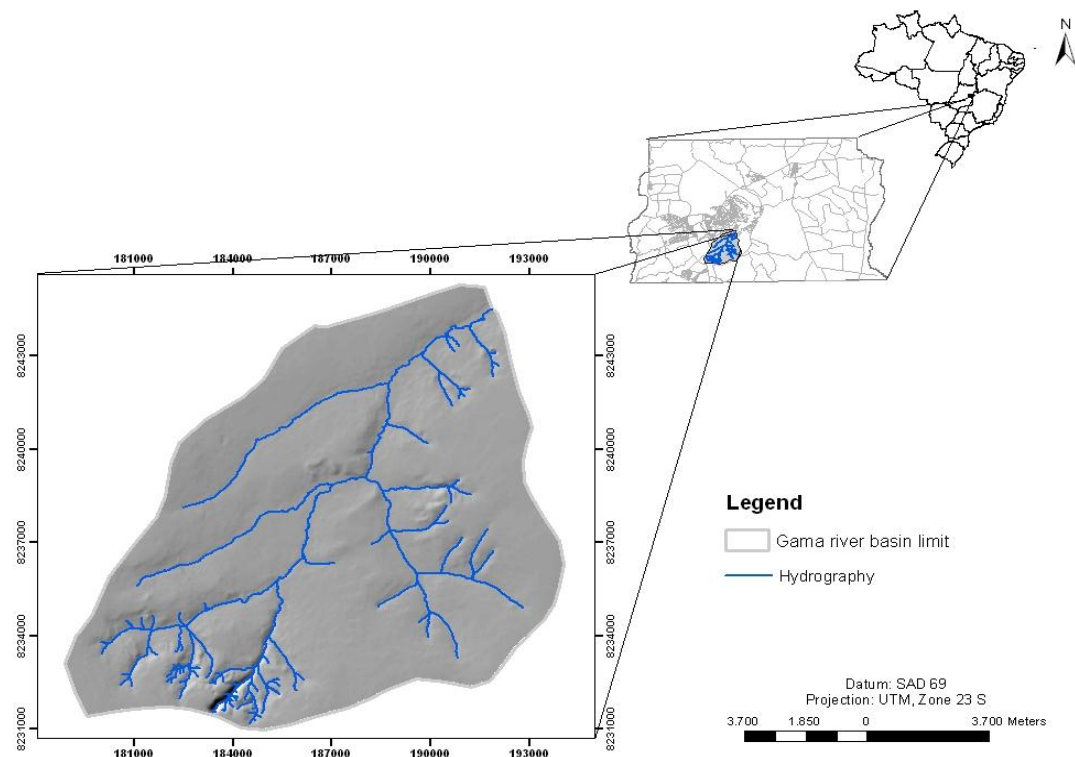
In this sense, this work aimed to analyze the quality of digital elevation models obtained by contour lines and the SRTM/Topodata, in order to the possibility of its use as an auxiliary tool in soil surveys.

## MATERIALS AND METHODS

### Description of the study area

The Gama river basin has an area of 141.20 km<sup>2</sup>, located between coordinates UTM Zone 23S, 191664m and 179621m south and 8245203m and 8231473 m west, inserted in the Cerrado Biome (Figure 1).

The climate in the study area, according to Köppen classification, fits between "tropical savanna" and "mild rainy winter dry", with a concentration of rainfall in summer (Martins, 1998).



**Figure 1.** Location map of the Gama river basin.

The geology of the Gama river basin comprises the Paranoá Group with age Meso /Neoproterozoic (1300 to 1100 million years), and is characterized by slate and sandy metarhythmites (Freitas Silva et al., 1998).

The geomorphology of the study specific area has been studied for several years and there is a significant body of studies such as Codeplan (1984), Novaes Pinto (1986, 1987 and 1994a, 1994b), Novaes Pinto (1984) and Martins et al. (1998). In the basin under study, according to Codeplan (1984) proposed geomorphological compartmentation to two smoothing residual surface in higher altitudes, depressions and plains.

The main source of soil information for study area is the soil survey conducted by Embrapa (1978), with development of pedological map scale 1:100,000. In the Gama river basin are present mainly the following classes: Red Oxisols (Latosols), Yellow-Red Oxisols, Cambisol, and Indiscriminate Hydromorphic soils and Plinthosols.

### **Assessment of digital elevation models**

This study evaluated a DEM generated from contour lines and a DEM obtained from SRTM/Topodata project (Valeriano, 2008) that provides free access to brazilian local geomorphometric variables. The SRTM/Topodata data were refined from the original spatial resolution to 1 arc-second (~30m) through the kriging interpolation process.

Both DEMs were assessed for vertical quality and the potential to derive terrain attributes that capture the main processes that occur in the area, like pedogenetics processes as hydromorfism, which occur in places with water accumulation, were happen mineral transformation and addition of organic matter, due to water presence.

To enable comparison, all DEMs were generated with a 30 m spatial resolution.

The DEM derived from contour lines was prepared using data such as elevation points, contours lines and hydrography from topographic maps (Codeplan, 1984) generated from aerial photographs restitution on a scale of 1:10,000, with equidistance of 10 meters between the contour lines. It was used a method based on surface adjustment Topo to Raster module® from ArcGIS 9.2®, which is an interpolation method specifically designed for the creation of hydrologically correct digital elevation models. It is based on the ANUDEM program developed by Hutchinson (1989).

The SRTM/Topodata data used in this study was obtained from the Topodata Project that aimed the construction of a national database with elevation and geomorphometric variables calculated from the available SRTM data for Brazil. Data processing was designed

to perform interpolation of the original SRTM-90m data by kriging (to 10 or nearly 30m resolution), followed by geomorphometric analyses of the produced digital elevation model, through GIS-based algorithms (Landim, 2003). This database included digital maps (images) of the basic local variables as height and slope angle. This development was based on two research components concerning to DEM processing, namely resampling and derivation. In the first component, the selection of a geostatistical set for a uniform interpolation to perform kriging on diverse topographic conditions was conducted among regionally pre-selected sets. Derivation procedures were adapted from previously developed algorithms designed to perform the basic derivations of DEM through geometrical approach, digitally simulating the measurement of the topographic variables according to their theoretical concepts (Shary et al., 2002).

The DEMs were evaluated and comparisons between the DEM generated by contour lines and obtained by the SRTM/Topodata were made by analyzing qualitatively the overall shape of the elevation profiles, like the differences between peaks and valleys and also comparing some descriptive data obtained from the DEMs. This analysis is important for the study area, because the soil distribution depends highly of the landscape shape.

According to Hutchinson & Gallant (2000), the contour lines derived from a MDE provide a sensitive assessment on the soil structure, which is quite useful, because its high sensitivity to errors in source data. Thus took place a visual comparison between level curves derived from the DEMs with the original contour lines to detect the presence of artifacts in the first. Moreover, as suggested by Wise (1998) and Hutchinson & Gallant (2000) was carried out a visual comparison between the drainage network mapped and derived drainage network by the different DEMs and also the comparison between the original contours lines and the derived contours lines.

The stream network derived from DEMs represents the pattern of flow accumulation and the potential location of river networks, which are important to identify places that have more probability to occur hydromorfism pedogenetics processes.

Through trial and error were obtained the accumulated flow value, using the Spatial Analyst® tool from ArcGis 9.2® necessary to generate the numerical drainage network with approximately the same level of detail of the drainage network mapped.

## **RESULTS AND DISCUSSION**

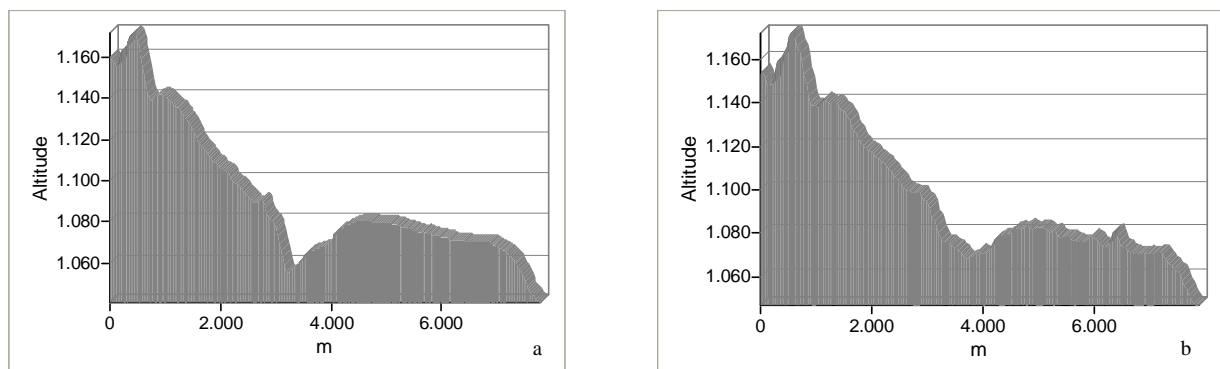
The results in Table 1 showed similarity between the values produced by DEM obtained by contours lines the DEM SRTM/Topodata. Chagas et al. (2010) also observed

similar values. The results obtained for the SRTM DEM can be influenced by characteristics of the terrain. Results obtained by Kocak et al. (2004) showed that the accuracy of DEMs derived from remote sensing images is very dependent on the slope, and the lower quality occurs in hilly areas than in plain areas.

**Table 1.** Descriptive statistics of DEM obtained by contours lines and DEM SRTM/Topodata.

DEM	Contours lines		SRTM/Topodata	
	Altitude (m)	Slope (degree)	Altitude (m)	Slope (degree)
<b>Minimum</b>	1002,22	0,01	1003,00	0,00
<b>Maximum</b>	1248,12	31,97	1248,00	43,00
<b>Average</b>	1097,25	5,18	1099,70	5,54
<b>Standard Deviation</b>	48,23	5,64	47,33	4,08

The Figure 2 shows the elevation profiles of the evaluated DEMs. In the SRTM/Topodata profile, near the stream, it is not clear the valley breakdown, probably due to the sensor type, which registers the treetops, and in these areas are usually large.

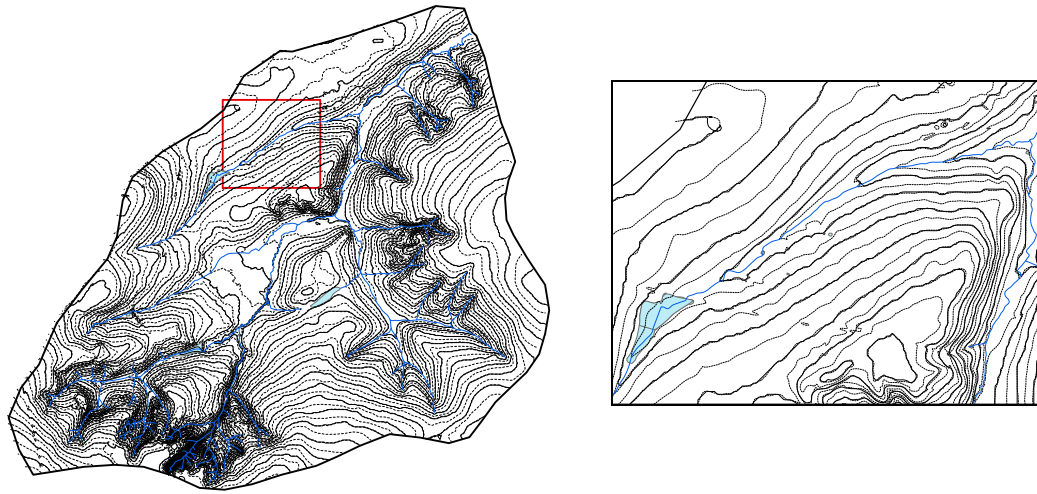


**Figure 2.** Elevation profile from digital elevation model generated from contour lines (a) and SRTM/Topodata (b) in the Gama river basin.

Jarvis et al. (2004) observed a similar trend in the elevation data influenced by the slope orientation, when assessing an SRTM DEM to Honduras, but in this study, the positive differences in relation to DEM from topographic maps, were present on the north, northeast or east slopes, while the negative slopes were observed in the south, east or west; these results, according to the authors were attributed to the effect of viewing angle.

The creation of a DEM seeks to obtain a model that contains topographical details, always preserving the land characteristics. In this study, the best agreement with the digitalized contours lines were restored by DEM created by contours lines, as shown in Figure

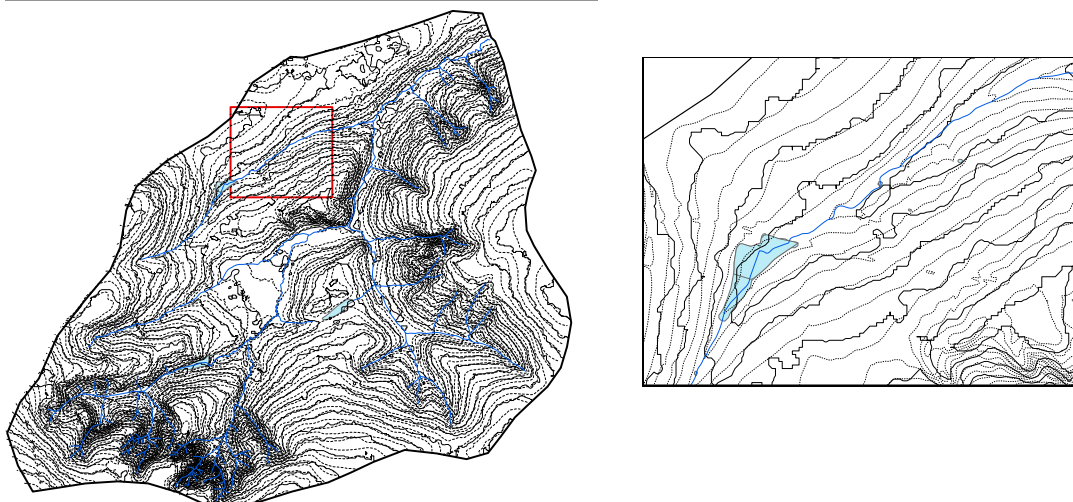
3. The peaks were maintained and only minor variations were noted comparing to the original lines, the DEM obtained by contours lines presented best results to this criterion.



**Figure 3.** Contours lines restored from the DEM obtained by contours lines.

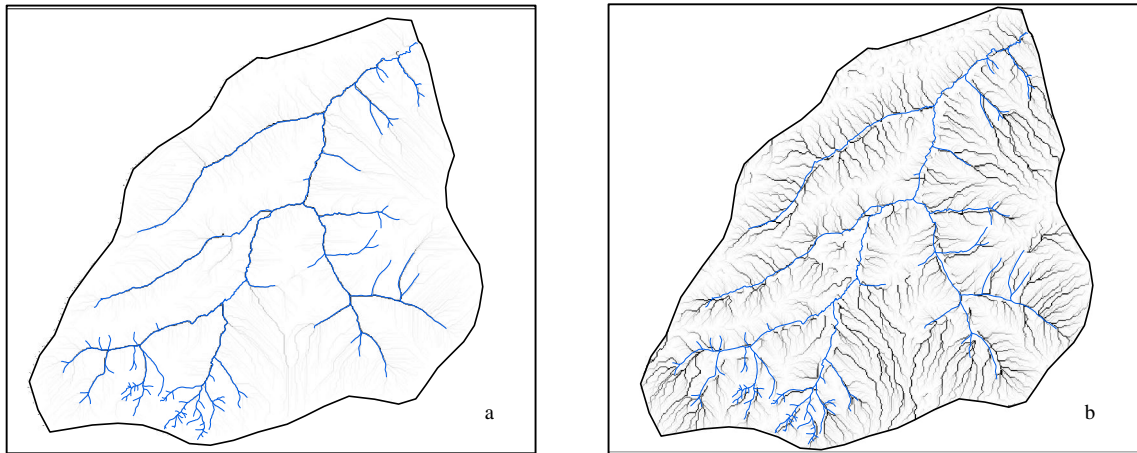
The DEM SRTM/Topodata showed little agreement with the original contours lines (Figure 4), however have not been verified contour lines that intersect.

Flow networks are critical for modeling runoff accumulation, stream flow, and flood response, and are derived using a neighborhood operator over a DEM represented as raster grids (O'Callaghan and Mark, 1984).



**Figure 4.** Contours lines restored from the DEM SRTM/Topodata.

The drainage network derived from DEM SRTM/Topodata showed poor agreement with the original map (Figure 5). The drainage network is important to identify places that have more probability to occur hydromorfism pedogenetics process.

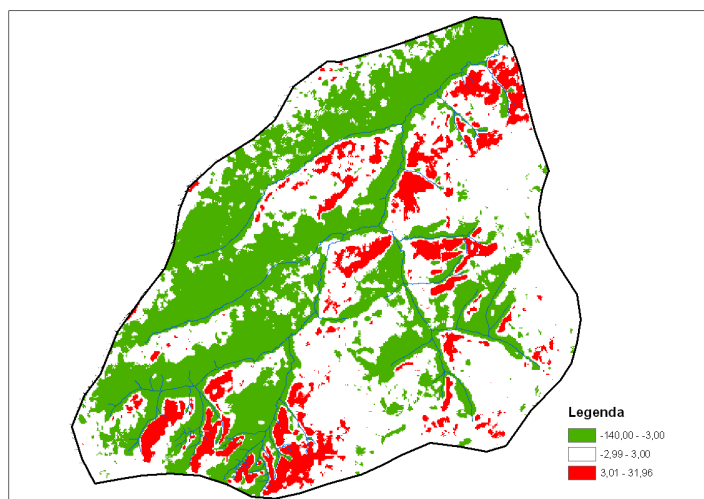


**Figure 5.** Flow direction generated from DEM obtained by contours lines and DEM SRTM/Topodata.

According to Figure 6 is possible to notice that the DEM SRTM/Topodata overestimated the altitude range especially at urbanized area (west portion) of Gama river basin. In areas with native vegetation preserved (east portion) this difference was about 3 meters for more or for less. This differences were also observed by Jarvis et al. (2004 similar trend in the elevation data influenced by the slope orientation, when assessing an SRTM DEM to Honduras, but in this study, the positive differences in relation to DEM from topographic maps, were present on the north,northeast or east slopes, while the negative slopes were observed in the south, east or west; these results, according to the authors were attributed to the effect of viewing angle.

After examining the quality of the DEMs, was observed that the DEM obtained from contours lines presented better quality compared to the DEM SRTM/Topodata.

This study showed that the SRTM DEM tends to underestimate elevation in peaks and ridges, and at this fine scale the 1:10,000 cartography contour lines produces a more accurate and more detailed DEM.



**Figure 6.** Difference between altitudes derived from DEM obtained by contours lines and DEM SRTM/Topodata.

However, due to the size of Brazil and the lack of soils maps with good scale, it should be consider the current availability of digital elevation models like the SRTM/Topodata, which is now freely accessible and covers the entire national territory, which can assist in soils mapping in other regions of Brazil.

## CONCLUSIONS

This study showed that the SRTM DEM tends to underestimate elevation in peaks and ridges, and at this fine scale the 1:10,000 cartography contour lines produces a more accurate and more detailed DEM.

However, due to the size of Brazil in a lack of soils maps with good scale, the availability and spatial coverage of the SRTM/Topodata make it a desirable option.

## REFERENCES

- Bailey N, Clements T, Lee JT, Thompson S (2003). Modelling soil series data to facilitate targeted habitat restoration: a polytomous logistic regression approach. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 67, pp. 395-407.
- Birkeland PW (1984). *Soils and geomorphology*. New York: Oxford University Press, New York, 430p.
- Campling P, Gobin A, Feyer J (2002). Logistic Modeling to Spatially Predict the Probability of Soil Drainage Classes. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 66, pp. 1390-1401.
- Codeplan (1984). *Atlas do Distrito Federal*. 1.ed., Brasília: GDF, Brazil, 124p.



- Chagas, C. S (2006). Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros. Viçosa: UFV, Doctor Degree Thesys, Brazil, 223p.
- Chagas CS, Fernandes Filho EI, Rocha MF, Carvalho Júnior W, Souza Neto NC (2010). Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Brazil, v.14, n.2, pp.218-226.
- Debella-Gilo M, Etzelmuller B, Klakegg O (2007). Digital soil mapping using digital terrain analysis and statistical modeling integrated into GIS: Examples from Vestfold county of Norway. *Scandinavian Research Conference on Geographical Information Sciences*, Norway, Proceedingsí Norway: ScanGISø2007.
- Embrapa (1978). Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Brazil, 455p.
- Figueiredo SR (2006). Mapeamento supervisionado de solos através do uso de regressões logísticas múltiplas e sistema de informações geográficas. Rio Grande do Sul: UFRS, Dissertação de Mestrado, Brazil, 93p.
- Freitas-Silva FH, Campos JEG, (1998). Geologia do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB. Brazil, v.1, 86p.
- Gobin A, Campling P, Feyen J (2001). Soil-landscape modelling to quantify spatial variability of soil texture. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 26, p. 41-45.
- Dobos E, Micheli E, Baumgardner, MF, Biehl L, Helt T (2000). Use of combined digital elevation model and satellite data for regional soil mapping. *Geoderma*, Amsterdam, v.97, pp.367-391.
- Hengl T (2003). Pedometric mapping: bringing the gaps between conventional and pedometric approaches. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 214p.
- Hutchinson, M.F. (1989). A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology* 106: 211-232.
- Hutchinson MF, Gallant JC (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. In: Wilson, JP., Gallant, JC. (ed.). *Terrain analysis: Principles and applications*. New York: John Wiley & Sons, pp. 29-50.
- Jarvis A, Rubiano J, Nelson A, Farrow A, Mulligan M (2004). Practical use of SRTM data in the tropics: comparisons with digital elevation models generated from cartographic data.

- Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Working document n.198, 32p.
- Kocak, G., Büyüksalih, G., Jacobsen, K. (2004). Analysis of digital elevation models determined by high resolution space images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.35, p.636-641.
- Landim, P. M. B. (2003). *Análise estatística de dados geológicos*. 2a. edição revista e ampliada. 2. ed. São Paulo/SP: Fundação Editora da UNESP/FEU, 253 p.
- Martins ES, Baptista GMM (1998). *Compartimentação Geomorfológica e Sistemas Morfodinâmicos do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, Brazil, v.1, 86p.
- McBratney AB, Odeh IOA, Bishop TFA, Dunbar MS, Shatar TM (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, Amsterdam, v. 97, n. 3-4, pp. 293-327.
- McBratney AB, Santos MLM, Minasny B (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, Amsterdam, v. 117, pp. 3-52.
- McKenzie NJ, Ryan PJ (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, Amsterdam, v.89, pp.67-94.
- Nanni MR, Rocha HO (1997). Integration of GIS technology, remote sensing and multivariate analysis in the delimitation of physiographic units for pedological mapping. *Boletim do Instituto de Geociências ó Série Científica*, n. 28, pp.129-143.
- Novaes Pinto M, Carneiro PJR (1984). *Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal*. IV Congresso Brasileiro de Geógrafos, 1984, São Paulo, Brazil.
- Novaes Pinto, M (1986). Unidades geomorfológicas do Distrito Federal. *Geografia*, v. 11, Brazil, pp.97-109.
- Novaes Pinto M (1987). Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia*, Brazil, v. 49(2), pp.9-26.
- Novaes Pinto M (1994a). *Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*, 2º ed. Brasília: Editora UnB, Brazil, pp.285-320.
- Novaes Pinto M (1994b). *Paisagens do cerrado no Distrito Federal. Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2º ed. Brasília: Editora UnB, Brazil, pp.511-542.
- O'Callaghan, JF.; Mark, DM. (1984). The Extraction of Drainage Networks From Digital Elevation Data. *Comput. Vision Graphics Image Process*, 28, 328-344.
- Odeh IOA, Chittleborough DJ, McBratney AB (1991). Elucidation of soil landform interrelationships by canonical ordination analysis. *Geoderma*, Amsterdam, v.49, pp.1-32.

- Shary, PA., Rukhovich, OV., Sharaya, LS., Mitusov, AV. (2002). Soils and topography: accumulation zones and non-local approaches. In: Transactions of 17-th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, August 14-21, Volume IV.
- Smith B, Sandwell D (2003). Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. *Geophysical Research Letters*, 30(9): pp.1467-1470.
- Valeriano MM (2008). Topodata: guia de utilização de dados geomorfométricos locais - São José dos Campos: INPE, Brazil.
- Valeriano MM (2004). Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul, São José dos Campos, INPE-10550-RPQ/756. Brazil.
- Wilson JP, Gallant JC (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley and Sons, New York, United States of America.
- Wise S (1998). The effect of GIS interpolation errors on the use of digital elevation models in geomorphology. In: Lane SN, Richards KS, Chandler JH. (ed.) *Landform monitoring, modelling and Analysis*. John Wiley and Sons, New York.