
GEOESTATÍSTICA NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS NO LITORAL NORTE DO ESTADO DO CEARÁ

Gustavo Souza Valladares

Doutor em Agronomia – Ciência do Solo, Professor Adjunto da Universidade Federal do Piauí, Departamento de Geografia e História

valladares@ufpi.edu.br

<http://lattes.cnpq.br/7710601501267719>

Resumo: O objetivo do presente trabalho foi avaliar uma metodologia para mapeamento digital de solos, com base na distribuição espacial de atributos dos solos, originários de sedimentos do Grupo Barreiras, nos tabuleiros costeiros da região do Baixo Acaraú, Ceará. Foi investigada a distribuição e dependência espacial dos teores de areia, argila, capacidade de troca catiônica e saturação por bases, usando-se semivariogramas e krigagem ordinária. Os horizontes superficiais dos solos estudados possuem textura arenosa e ausência de dependência espacial. Todavia, os horizontes subsuperficiais apresentam dependência espacial e adequado ajuste de semivariogramas. Os resultados encontrados indicam que a geoestatística pode ser uma importante ferramenta no auxílio ao mapeamento e classificação de solos dos tabuleiros costeiros do Ceará, por haver dependência espacial de diferentes atributos nos horizontes subsuperficiais. Porém, os trabalhos de campo e técnicas tradicionais são imprescindíveis no sucesso do mapa final.

Palavras-Chave: krigagem. mapeamento digital de solos. Grupo Barreiras.

GEOSTATISTICS ON THE DIGITAL SOIL MAPPING OF COASTAL PLAIN FROM NORTH CEARÁ

Abstract: The objective of the present work was evaluate a methodology on digital soil mapping, based on spatial distribution of soil attributes, formed from Barreiras Group sediments, on the coastal plains of Baixo Acaraú region, Ceará, Brazil. The spatial distribution and dependency of sand content, clay, cation exchange capacity and base saturation, using semivariograms and ordinary kriging. The soil surface horizons studied has sandy texture and do not have spatial dependency. However, the subsurface horizons presented spatial dependency and good semivariograms adjusts. The results indicate that geostatistics may be an important tool on improve soil mapping and classification on the coastal plain from Ceará, because there is spatial dependence of different attributes in subsurface horizons. However, the field works and traditional technics are fundamentals on the success of final map.

Key words: kriging. digital soil mapping. Barreiras Group.

GEOESTADÍSTICA EN LA CARTOGRAFÍA DIGITAL DE SUELOS DE LOS TABULEROS COSTEROS EN EL NORTE DEL ESTADO DE CEARÁ

Resumen: El objetivo de este estudio fue evaluar una metodología para la cartografía digital de suelos, con base en la distribución espacial de las propiedades del suelo, procedentes de los sedimentos de Grupo Barreiras, en los tabuleros costeros del Baixo Acaraú, Ceará, Brasil. Se investigó la distribución y la dependencia espacial de arena, arcilla, capacidad de intercambio catiónico y la saturación de base, utilizando kriging ordinario y semivariograma. Los horizontes superficiales de estos suelos tienen textura arenosa y la ausencia de dependencia espacial. Sin embargo, los horizontes subsuperficiales presentan dependencia espacial y el ajuste adecuado de semivariogramas. Los resultados indican que la geoestadística puede ser una herramienta importante para ayudar a la cartografía y la clasificación de los suelos de los tabuleros costeros de Ceará. Sin embargo, las técnicas de trabajo de campo y tradicionales son esenciales para el éxito del mapa final.

Palabra clave: kriging. cartografía digital de suelos. Grupo Barreiras.

INTRODUÇÃO

A interpretação do levantamento e mapeamento de solos é uma tarefa de mais alta relevância, para utilização racional desse recurso natural, seja na agricultura, no planejamento urbano, no planejamento regional, e em outros setores, que utilizam-no como elemento integrante de suas atividades. O conhecimento desse recurso natural permite a sua exploração de forma racional e impede sua degradação, pois permite adequação a capacidade de suporte e recomendações de manejo sustentáveis.

Com o desenvolvimento da computação e das tecnologias de informação foram gerados os sistemas de informação geográfica (SIG), GPS, sensoriamento remoto, modelos digitais de terreno, ferramentas geoestatísticas, modelagens e monitoramento ambiental. Neste contexto foram criadas várias ferramentas para criação e análise de dados espaciais, aplicados em vários ramos da ciência, inclusive na ciência do solo (McBRATNEY et al., 2003), onde este conjunto de técnicas tem recebido o nome de mapeamento digital de solos. Vários trabalhos têm sido feitos na linha do mapeamento digital de solos (LAGACHERIE et al., 1995; MCKENZIE & RYAN, 1999; LAGACHERIE et al., 2001; NOVAES FILHO et al., 2007; VALLADARES & HOTT, 2008; TEN CATEN et al., 2011; LAGACHERIE et al., 2012). Tais técnicas são muito úteis em áreas de estudo com informações ambientais esparsas, ou de difícil acesso, além do mais reduzem a densidade de trabalhos de campo e o custo dos levantamentos e mapeamentos tradicionais de solos.

Quando um atributo do solo varia de um local para outro com algum grau de continuidade, como pode ocorrer com propriedades químicas e físicas, a dependência espacial

pode ser verificada utilizando a análise geoestatística. A geoestatística permite uma análise espacial útil ao planejamento e ao controle das informações de produção (VIEIRA, 2000; CARVALHO et al., 2002; DRUCK et al., 2004; WENDROTH et al., 1997; VALLADARES et al., 2009).

A modelagem geoespacial permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial dos atributos dos solos e a estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores desses atributos em locais não amostrados. Acessar essa variabilidade faz da geoestatística uma eficiente ferramenta de suporte a decisão de amostragem para monitoramento de variáveis dependentes espacialmente (DRUCK et al., 2004). As intervenções para corrigir variações indesejáveis de atributos do solo podem ser baseadas em mapas de isolinhas das variáveis dependentes espacialmente. A geoestatística pode ser uma importante ferramenta na caracterização e mapeamento de atributos dos solos (KUMAR et al., 2012) em áreas extensas e com dados escassos. Há algumas décadas já se tem conhecimento da utilidade do mapeamento de atributos dos solos com o uso da krigagem (ODEH et al., 1995; WALTER, et al., 2001), técnica pode auxiliar nos mapeamentos pedológicos.

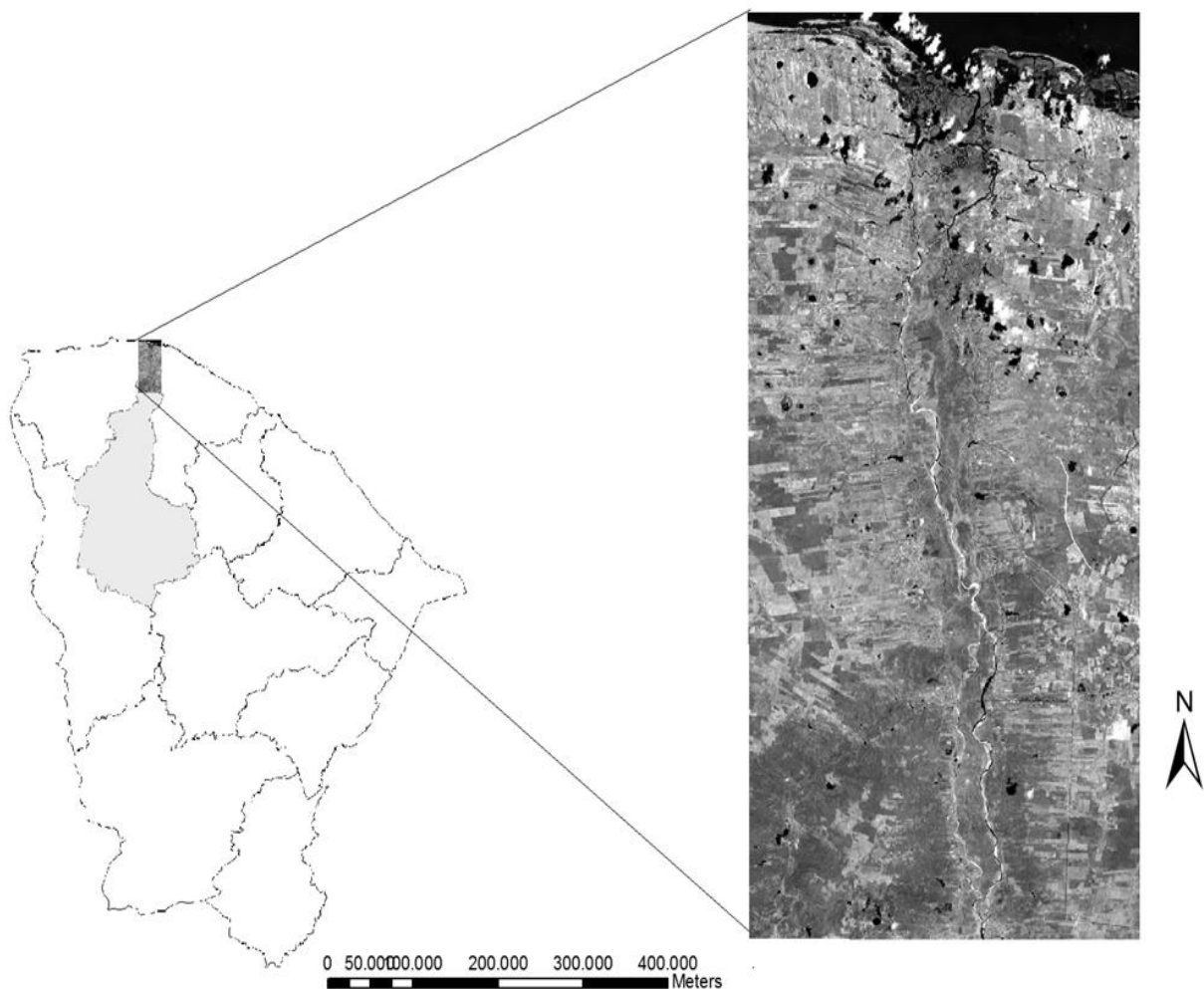
O relevo suave ondulado e pouco dissecado dos tabuleiros costeiros do baixo curso do Rio Acaraú (SOBRINHO, 2006; DINIZ et al., 2008; MOTA & VALLADARES, 2011), sugere uniformidade taxonômica e dos atributos dos solos. Porém o mapeamento pedológico da área em questão indica grande variabilidade dos solos, até mesmo no primeiro nível categórico, uma vez que ocorrem Argissolos, Neossolos e Latossolos, como solos predominantes nos topos dos tabuleiros e terços superiores (MOTA, 2011), todavia em sua maioria com textura arenosa nos horizontes superficiais (LIMA et al., 2004; MOTA, 2011; MELO, 2012). A respeito do gradiente textural, observa-se na maioria dos perfis de solos, baixo incremento de argila em profundidade, característica morfológica que no campo, por intermédio da interpretação expedita da textura, confere dúvida quanto a classificação do solo, que somente pode ser conferida diante dos resultados de laboratório. Neste contexto os resultados de laboratório corroboram a caracterização morfológica verificada no campo, indicando grande variabilidade dos solos (MOTA, 2011).

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a distribuição espacial de atributos dos solos, originários de sedimentos do Grupo Barreiras, nos tabuleiros costeiros da região do Baixo Acaraú, Ceará, visando fornecer subsídios para a delimitação mais precisa de unidades de mapeamento de solos.

METODOLOGIA DA PESQUISA

A região do Baixo Acaraú está inserida na bacia do Rio Acaraú, região norte do Estado do Ceará, possui aproximadamente 315 km de extensão e desenvolve-se no sentido sul-norte (COGERH, 2009). A área de estudo com um total de 1.067,22 km² está localizada entre as coordenadas geográficas em UTM aproximadas de 9642166S/383760W e 9689810S/360444W, fuso 24, e corresponde a porção mais baixa da bacia do Rio Acaraú (Figura 1), englobando os municípios de Acaraú, Cruz, parte de Bela Cruz e de Marco. Nessa região foi criado e implantado o Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, que vem se expandindo e corresponde a aproximadamente 11,6% da área estudada.

Figura 1. Representação do Estado do Ceará com destaque para a área de estudo.



A precipitação média anual está em torno de 900 mm, sendo o período seco de julho a dezembro e o chuvoso de janeiro a junho (DINIZ et al., 2008). A umidade relativa média varia de níveis < 50% a > 80%, onde o primeiro ocorre nas regiões mais secas e nos meses de

estiagem e a segunda ocorre nas regiões mais úmidas (KÖPPEN & GEIGER, 1928). O relevo apresenta inclinação razoavelmente suave, porém, com forte declividade longitudinal.

A litologia da área de interesse refere-se aos sedimentos clásticos areno-argilosos do Grupo Barreiras (Ministério das Minas e Energia – Departamento Nacional da Produção Mineral, 1973), podendo ocorrer conglomerados e concreções de ferro (petroplintita). Este material geológico dá origem aos tabuleiros costeiros comuns no litoral do Ceará. Sendo a área de interesse aquela correspondente aos solos originários de sedimentos do Grupo Barreiras. Excluindo-se, portanto os solos originários de rochas do cristalino e de sedimentos do quaternário.

Quanto à pedologia, os solos dos tabuleiros na área de estudo, em sua grande maioria apresentam horizonte superficial com textura arenosa. Sendo classificados principalmente como Argissolos Amarelos e Acinzentados, desde típicos até espessarênicos, Neossolos Quartzarênicos e Latossolos Amarelos. A granulometria dos solos neste caso é o principal atributo na diferenciação das classes taxonômicas, sendo que os Neossolos Quartzarênicos são arenosos até profundidades superiores a 1,5m (EMBRAPA, 2006), os Latossolos apresentam pequeno gradiente textural, apresentando textura do horizonte B latossólico média e os Argissolos, apresentam elevado gradiente textural, com horizonte B textural de textura média e argila de atividade baixa (EMBRAPA, 2006; MOTA, 2011). A diversidade taxonômica devido a variabilidade da composição granulométrica dos solos em profundidade é grande, com os Argissolos podendo ser típicos arênicos ou espessarênicos (EMBRAPA, 2006).

A composição mineralógica da fração areia desses solos é principalmente de quartzo. Uma análise mais detalhada dos perfis dos solos, indica variabilidade elevada na espessura dos horizontes com textura arenosa, na cor dos horizontes subsuperficiais e na saturação por bases (V%). Características estas essenciais na classificação dos solos e no mapeamento.

Os solos para fins de classificação e mapeamento foram amostrados, caracterizados e classificados segundo normas propostas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo e pela Embrapa, detalhadas no Manual de Descrição e Coleta de Solo no campo (SANTOS et al., 2005) e no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). Os solos foram descritos e coletados com tradagens e em perfis, todos georreferenciados com GPS. Os limites do mapa produzido de forma tradicional foram estabelecidos de acordo com os Procedimentos Normativos para Levantamentos Pedológicos (EMBRAPA, 1995).

Foram coletadas 71 amostras georreferenciadas de horizontes superficiais e subsuperficiais, até 1,5m de profundidade, com as coletas variando de acordo com a

profundidade de ocorrência dos horizontes diagnósticos, e analisadas os teores de areia, argila, CTC e V%, segundo Embrapa (1997).

Os dados foram analisados por estatística descritiva. Para verificar a dependência espacial das variáveis, interpolar dados e elaborar os mapas, foi empregada a análise geoestatística segundo Vieira (2000). Foi utilizado o GS+, versão Beta para ajuste dos semivariogramas e o ArcMap 10.1 para interpolação dos dados. Foram construídos semivariogramas, partindo das pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância $\gamma(h)$ estimada pela Equação 1:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i+h))^2 \quad (1)$$

Em que $N(h)$ é o número de pares dos valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . É esperado, segundo Vieira (2000), que medições localizadas próximas sejam mais parecidas entre si do que aquelas separadas por grandes distâncias, isto é, que aumente $\gamma(h)$ com a distância h até um valor máximo, no qual se estabiliza em um patamar correspondente à distância limite de dependência espacial, que é o alcance. Medições localizadas a distâncias maiores que o alcance terão distribuição aleatória, razão por que serão independentes entre si. Os semivariogramas que apresentaram dependência espacial foram ajustados com o modelo matemático de melhor correspondência.

Foi calculado o grau de dependência espacial (GD), que é a proporção em percentagem do “partial sill” (C_1) em relação ao patamar (C_0+C_1) (Equação 2), sendo, segundo Zimback (2001) e Trangmar et al. (1985), dependência fraca <25%, dependência moderada de 26 a 75 e dependência forte > 75%.

$$GD = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Uma vez que o semivariograma representa a variabilidade espacial dos dados, a análise geoestatística permitiu a análise dos dados comparando-se os parâmetros de ajuste dos semivariogramas para cada uma das variáveis estudadas.

Havendo dependência espacial demonstrada pelo semivariograma, pode-se estimar valores para qualquer outro local que não foi amostrado, usando-se a krigagem, que segundo

Vieira et al. (2002), estima os valores com condições de não tendenciosidade e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos, ou seja, com variância mínima (Equação 3):

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3)$$

Onde $\gamma(X_i, X_j)$ é a semivariância estimada, usando o modelo ajustado ao semivariograma, correspondente à distância entre os pontos localizados na posição x_i e x_j e $\gamma(x_i, x_0)$ é a semivariância correspondente à distância entre os pontos localizados na posição x_i e x_0 . Valores de peso λ e um valor do multiplicador de Lagrange, m , associado com a minimização da variância, são gerados e com os valores de λ_i podem-se estimar valores (Z) no espaço amostrado para qualquer posição x_0 . Com os valores estimados (Equação 4), foram construídos mapas de isolinhas, em função da coordenada geográfica. O uso da krigagem como interpolador permite mostrar a variabilidade espacial de determinada área, pois a partir dela é possível a construção de mapas de isolinhas.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

Para verificar a existência de correlação espacial entre a CTC e os teores de argila nos horizontes subsuperficiais, foi realizada a análise de semivariograma cruzado ou “cross” semivariograma, que evidencia a ocorrência ou não da dependência espacial entre duas variáveis amostradas nos mesmos locais e que apresentam certo grau de correlação.

Se existir dependência espacial para cada uma das variáveis (Z_1 e Z_2), a existência de dependência espacial entre Z_1 e Z_2 pode ser testada. O cálculo do semivariograma cruzado é usado para avaliar a autocorrelação espacial entre os pares de variáveis (Z_1 e Z_2), (Equação 5).

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n (Z_1(x_i) - Z_2(x_i))^2 \quad (5)$$

Segundo Vauclin et al. (1983), se existir dependência espacial para cada uma das variáveis (semivariogramas) e também entre elas (“cross” semivariograma) a cokrigagem pode ser usada para estimar valores da variável de menor densidade de amostragem (variável

principal) em relação à densamente amostrada (variável secundária). Entretanto, como os pontos de amostragem da CTC e da argila são exatamente os mesmos e na mesma densidade de amostragem, foi construído apenas o semivariograma cruzado para verificar a correlação da dependência espacial entre os dois atributos. O ajuste por co-krigagem foi melhor, do que somente a krigagem para a CTC.

O gradiente textural, que é um atributo para classificar horizonte B textural, diagnóstico dos Argissolos da área de estudo foi espacializado da seguinte maneira: os solos com alto gradiente textural, isto é com horizonte B textural receberam nota 1, enquanto aqueles com baixo gradiente textural nota 0. Utilizando o inverso do quadrado das distâncias os dados foram interpolados e espacializados. E desta forma foi possível delimitar os solos com B textural, conseqüentemente os Argissolos. Para geração do mapa por meio de metodologia digital, os atributos granulométricos foram sobrepostos e agrupados os solos com textura arenosa em todo o perfil, classificados como Neossolos Quartzarênicos e aqueles com textura média no horizonte subsuperficial B, agrupados como Argissolos ou Latossolos. Para diferenciar Argissolos e Latossolos foi considerado o mapa do gradiente textural, que diferenciou os Argissolos, como tendo alto gradiente textural, dos Latossolos com baixo gradiente textural.

Os Argissolos e os Latossolos segundo o SiBCS (EMBRAPA, 2006) são separados no terceiro nível categórico em eutróficos ou distróficos. Para identificar esta característica foi empregada krigagem nos dados de V% dos horizontes subsuperficiais.

Os perfis de solos classificados segundo o SiBCS e o mapa produzido com auxílio dos limites traçados pela geostística, o mapa digital, foram comparados em ambiente SIG, considerando o primeiro nível categórico, e foi calculado o índice de acurácia de mapas kappa, segundo Ma & Redmond (1995).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros estatísticos descritivos de todos os atributos obtidos nas análises dos solos (Tabela 1) permitem identificar valores discrepantes e a normalidade dos dados pelos valores de assimetria e curtose.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos, assimetria e curtose) e de ajuste dos semivariogramas (C_0 efeito pepita; C patamar, A alcance e r coeficiente de correlação) dos atributos dos solos de tabuleiros do Baixo Acaraú, CE.

Atributo	Unidade	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose	C_0	C	A	r	Ajuste
Horizontes superficiais													
Areia	%	89	6	7	71	95	-1,75	2,40					Efeito Pepita Puro
Argila	%	4	1	25	2	5	0,38	-1,38					Efeito Pepita Puro
CTC	cmol _c kg ⁻¹	4,0	2,1	53	2,1	8,4	1,07	-0,39					Efeito Pepita Puro
Valor V	%	61	24	39	24	91	-0,27	-1,42					Efeito Pepita Puro
Horizontes subsuperficiais													
Areia	%	81	7	9	57	97	-0,84	2,60	1,2	51,6	11870	0,70	Esférico
Argila	%	7	6	86	1	33	2,24	5,83	0,1	49,1	5760	0,60	Gaussiano
CTC*	cmol _c kg ⁻¹	2,5	0,7	28	1,5	4,3	0,79	-0,06	0,001	3,0	10130	0,68	Gaussiano
Valor V	%	61	20	33	19	93	-0,46	-0,40	225	1061	29910	0,77	Gaussiano

* Cokrigagem entre CTC e argila.

Com base na Tabela 1, observa-se o predomínio de solos com textura arenosa na área de estudo, principalmente nos horizontes superficiais. Nos horizontes superficiais o teor máximo de argila foi de 5%, enquanto nos subsuperficiais foi de 33%, indicando solo de textura média. Esta variabilidade no teor de argila nos horizontes subsuperficiais pode levar a diferentes classificações dos solos, podendo variar entre Neossolos Quartzarênicos (solos de textura arenosa até profundidades superiores a 1,5m), Argissolos Amarelos (que apresentam elevado gradiente textural) e Latossolos Amarelos (baixo gradiente textural). Os Argissolos Amarelos e os Latossolos Amarelos na área de estudo apresentam textura do horizonte subsuperficial média. No campo a distinção entre esses solos não é tarefa simples, pois os elevados teores de areia confundem a avaliação textural expedita. A interpretação dos resultados com o uso da krigagem pode facilitar a delimitação das unidades de mapeamento de solos.

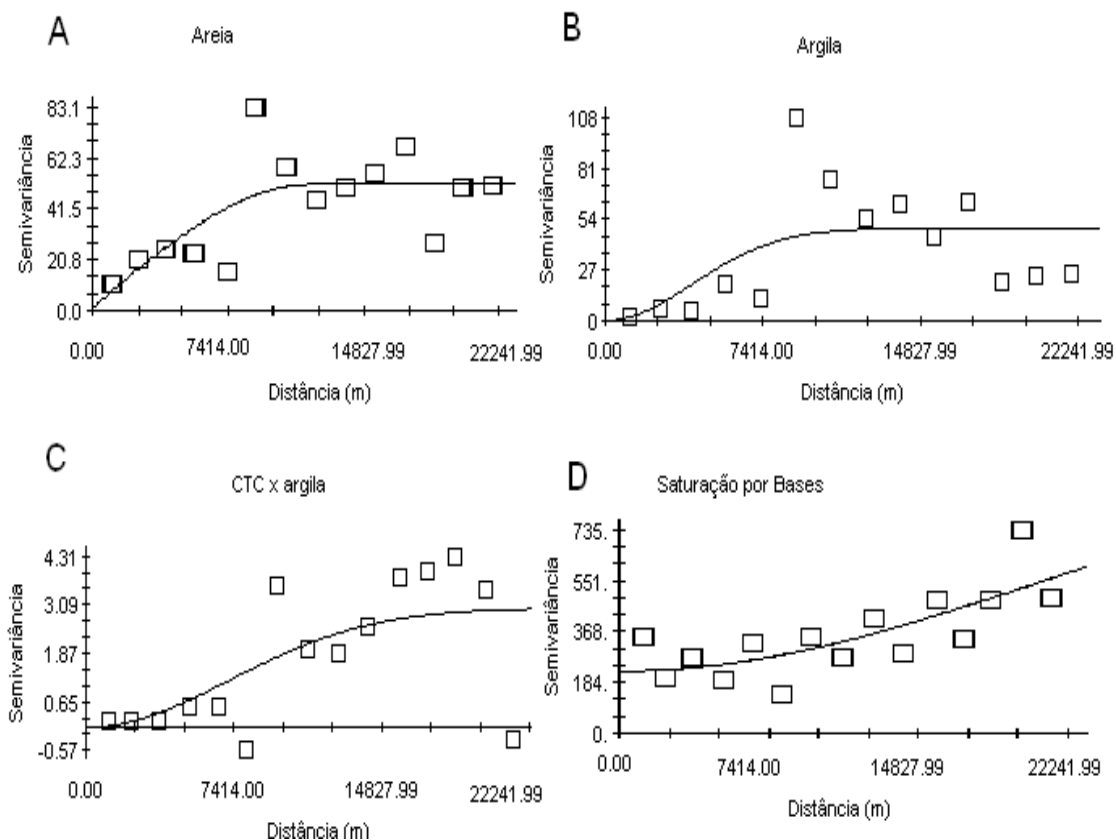
Quando verificada a dependência espacial através do ajuste do semivariograma, foram obtidos os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C) e alcance (A) (Tabela 1), utilizados na krigagem, segundo Vieira (2000). A aleatoriedade dos dados (efeito pepita puro), ou a

ausência de dependência espacial, ocorreu para todos os atributos pesquisados dos horizontes superficiais, não sendo possível o ajuste dos semivariogramas pela inexistência do patamar (C). Isto pode ser devido à baixa densidade amostral em relação ao tamanho da área, resultando em vizinhos próximos com valores discrepantes, associada à pequena variabilidade dos teores de areia e aos baixíssimos teores de argila a pequenas profundidades. Melo (2012), trabalhando com Argissolos do perímetro irrigado do Baixo Acaraú, também não conseguiu bom ajustes de semivariogramas para os atributos granulométricos nas camadas superficiais dos solos, mesmo trabalhando com menores distâncias entre amostras.

Os usos do solo também podem ter influenciado na falta de dependência espacial, pois as amostras foram coletadas em áreas com diferentes usos como vegetação secundária, campos, cultivos tradicionais de cajueiro e agricultura irrigada, o que pode ter influenciado na CTC e V%, uma vez que o horizonte superficial é o mais afetado pelo manejo agrícola. Os resultados da saturação por bases indica a presença de solos eutróficos e distróficos, atributo que diferencia solos no terceiro nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SiBCS (EMBRAPA, 2006). Os valores de CTC dos solos são considerados baixos, refletindo a baixa atividade da argila, a textura arenosa e os baixos teores de matéria orgânica (MELO, 2012).

Ao se avaliar os resultados dos ajustes dos semivariogramas para os horizontes subsuperficiais, verificou-se que todos os atributos apresentaram boa dependência espacial (Figuras 1A, 1B, 1C e 1D), indicando que o método de interpolação dos dados pela krigagem pode ser empregado. O grau de dependência espacial também foi elevado para estes atributos, sendo de 98, 99, 99 e 79%, respectivamente para areia, argila, CTC e V%. Estes resultados indicam que a geoestatística pode ser empregada para auxiliar no mapeamento dos solos, tanto de atributos granulométricos como químicos no caso a saturação por bases. Optou-se pela interpolação dos dados de CTC para os horizontes subsuperficiais pela cokrigagem em função dos teores de argila, devido ao melhor ajuste do semivariograma cruzado (Figura 2C).

Figura 2. Semivariogramas ajustados para os atributos dos horizontes subsuperficiais dos solos dos tabuleiros do Baixo Acaraú. A – areia, B – argila, C – CTC em função dos teores de argila e D – V%.



Os mapas da Figura 3 representam a espacialização de dados com dependência espacial dos horizontes subsuperficiais, sendo os mapas limitados aos tabuleiros costeiros, delimitados por Mota (2011). Os teores de areia (Figura 3A) apresentam correlação espacial com a proximidade da linha do litoral, percebe-se que os teores de areia são maiores nos solos mais próximos do litoral, indicando predomínio de Neossolos Quartzarênicos nas áreas dos tabuleiros mais próximas ao mar. Os maiores teores de areia próximos ao litoral podem ser reflexo dos ventos fortes e constantes que transportam tais sedimentos que ao longo do tempo recobrem os sedimentos mais finos dos tabuleiros costeiros. Tendência contrária é observada na distribuição dos teores de argila (Figura 3B) indicando que quanto mais distante do litoral mais fina é a textura dos solos nos horizontes subsuperficiais, porém com manchas de solos com baixos teores de argila no centro-leste da área de interesse. Nas porções mais distantes do litoral é mais frequente a ocorrência de Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos com textura média nos horizontes subsuperficiais (MOTA, 2011), propriedades dos solos muito bem representadas no presente trabalho.

A CTC dos solos (Figura 3C) apresentou alta correlação espacial com os teores de argila, o que pode ser observado no mapa, indicando que quanto mais próximo do litoral menores os teores de argila e menor a CTC do solo.

Os valores de saturação por bases não se correlacionaram espacialmente com a proximidade do litoral, observa-se que na porção mais central o V% é maior, em contraposição às porções norte (litorânea) e sul (sertão). Pode-se observar que a maior parte dos solos são eutróficos, apresentando mais de 50% de saturação por bases nos horizontes subsuperficiais.

A Figura 4A apresenta o mapa de solos convencional no 2º nível categórico (subordem) do SiBCS (Embrapa, 2006). É importante ressaltar que classes de solos apresentadas correspondem somente a classe predominante, porém as unidades de Argissolos e Latossolos são associações que apresentam Neossolos Quartzarênicos como componentes secundários. O mapeamento convencional indica a elevada frequência de solos arenosos (Neossolos Quartzarênicos), que correspondem a 43% da área de estudo.

Comparando a Figura 4B, referente ao mapa digital de solos produzido por métodos de interpolação, com a Figura 4A, percebe-se uma boa correspondência entre os mapas, porém nota-se uma certa superestimação dos Neossolos Quartzarênicos. Todavia, nas unidades de Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos são verificados Neossolos Quartzarênicos com alta frequência. Estes resultados são corroborados pelos trabalhos de Trangmar et al. (1985) e Campos et al. (2007), que empregaram a geoestatísticas na delimitação de unidades de mapeamento de solos.

Utilizando 34 perfis coletados como verdade de campo para avaliar o nível de acerto e a acurácia do mapa digital de solos, há um acerto de 65% da totalidade dos perfis, sendo um acerto de 100% para os Neossolos Quartzarênicos e 40% para os Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos. O índice kappa obtido pelo mapa digital foi de 0,41, indicando grau moderado, segundo Landis & Koch (1977). Estes resultados confirmam uma superestimativa das áreas mapeadas como Neossolos Quartzarênicos, corroborando com o mapa convencional que apresenta associações de solos, contendo Neossolos Quartzarênicos como segundo ou terceiro componente da associação.

Analisando o grau de acerto e acurácia da saturação por bases o acerto foi de 81%. O índice kappa foi de 0,49, também com grau moderado de acurácia (Landis & Koch, 1977).

Figura 3. Distribuição espacial de atributos de horizontes subsuperficiais dos solos na Região do Baixo Acaraú, sobre os tabuleiros costeiros. A-areia, B-argila, C-CTC e D-Valor V.

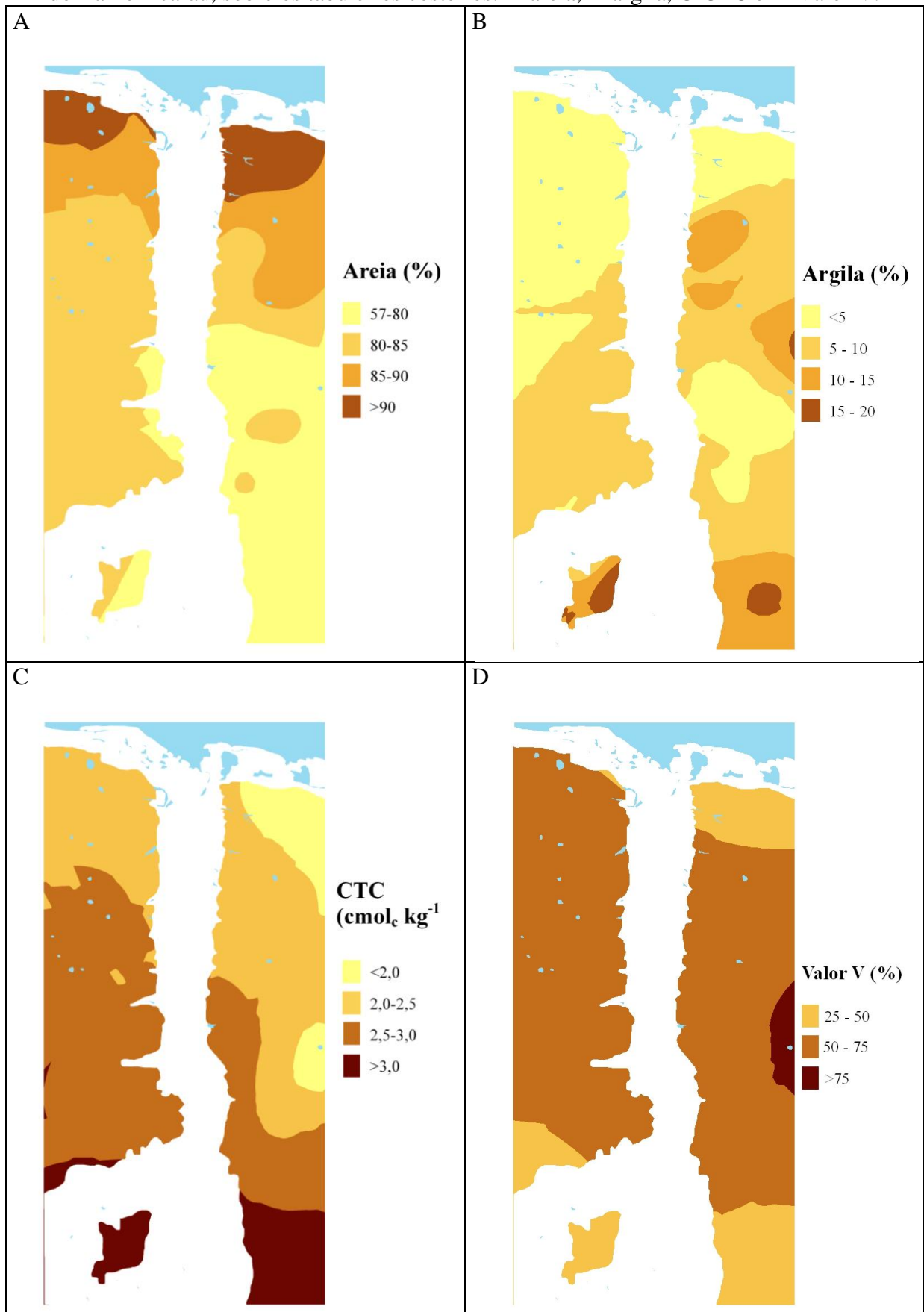
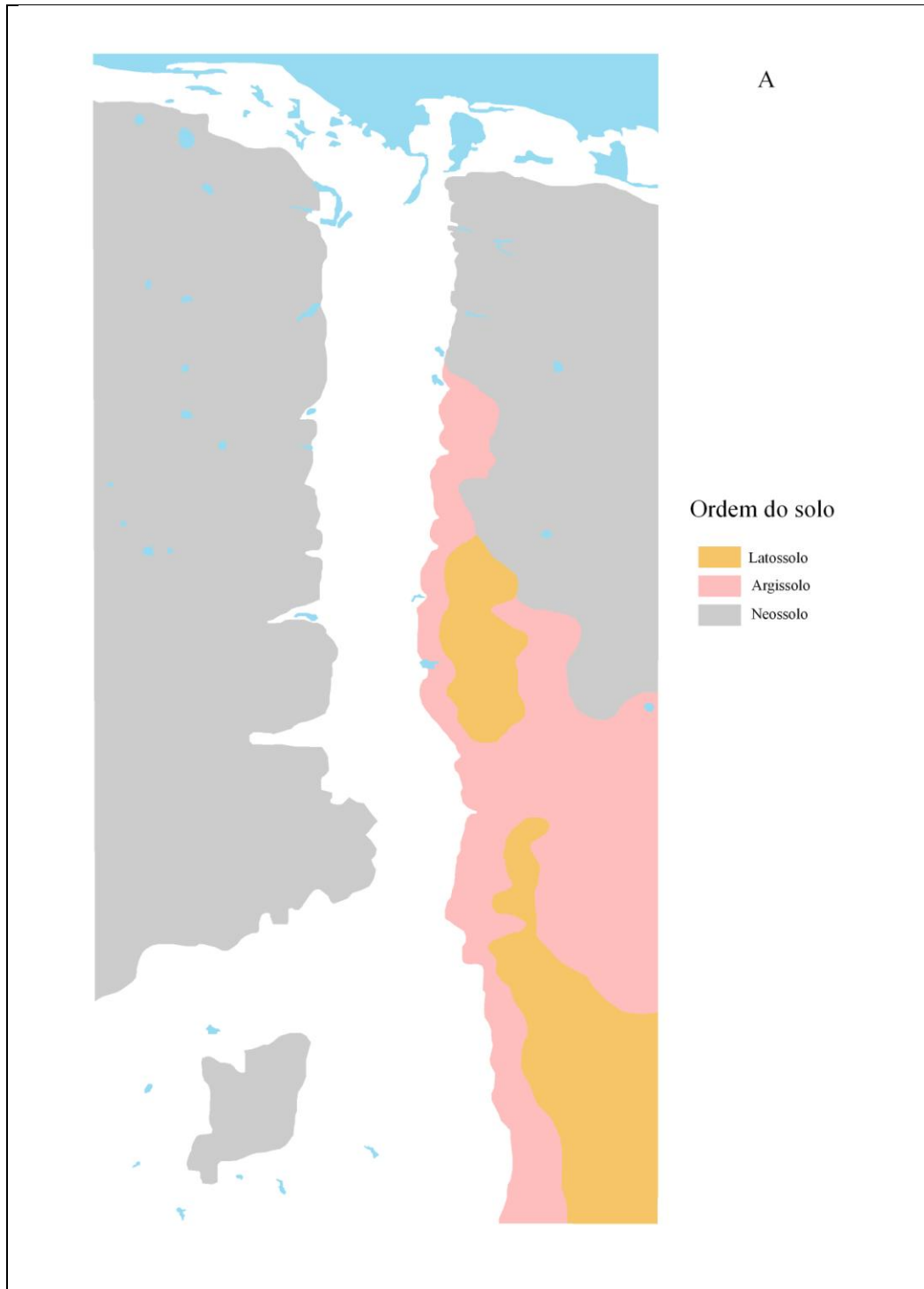
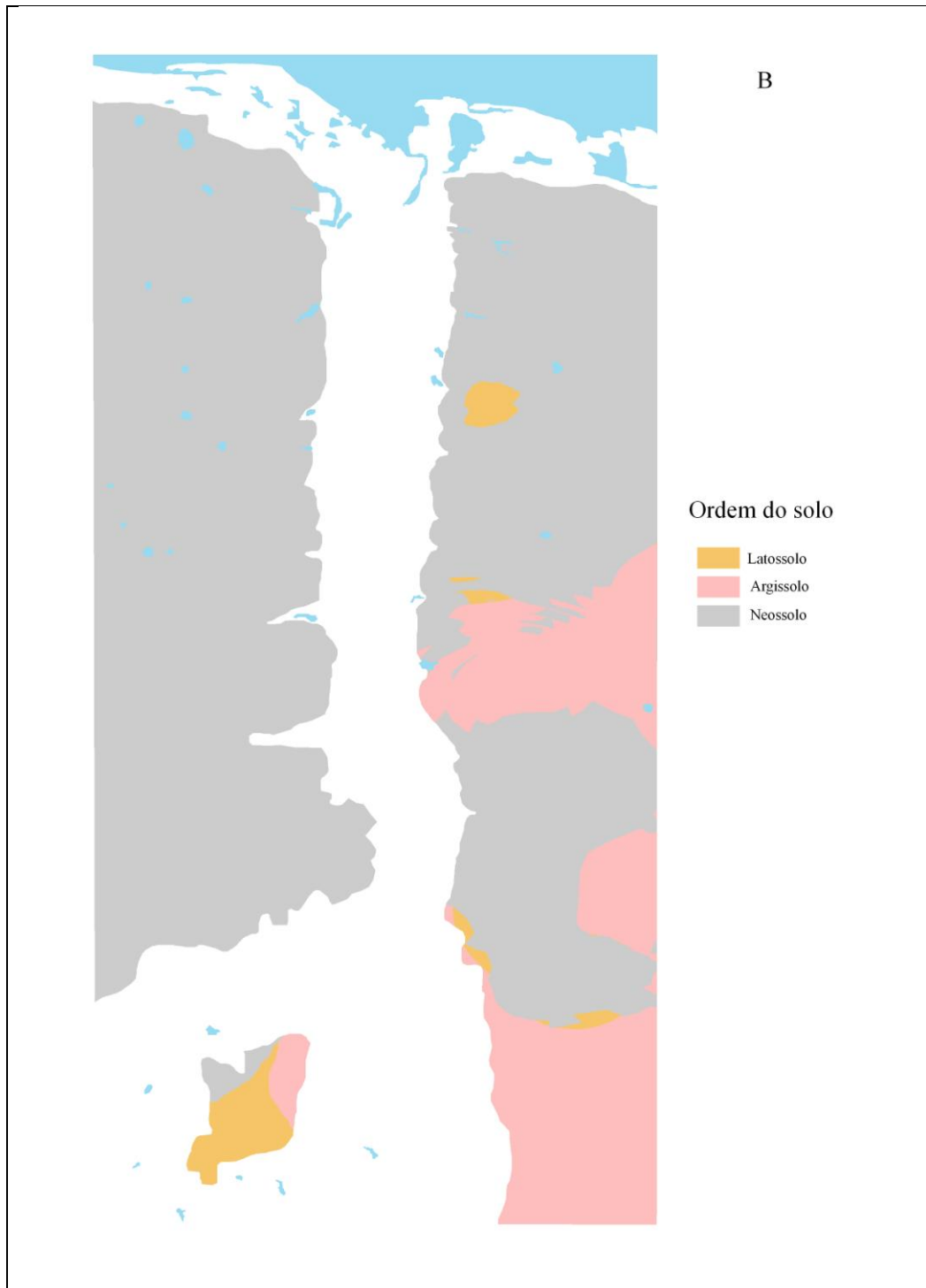


Figura 4. Mapa tradicional (A) e digital (B)de solos da Região do Baixo Acaraú, sobre os tabuleiros costeiros.





CONCLUSÕES

O emprego da geoestatística na presente área de estudo, mostrou-se eficiente no auxílio à tomada de decisão para o mapeamento dos solos dos tabuleiros costeiros, originários do Grupo Barreiras, indicando que a metodologia proposta pode melhorar o delineamento das unidades de mapeamento e facilitar na definição das unidades simples ou compostas de solos.

Destaca-se a importância das observações de campo no sucesso no mapeamento de solos, destacando que os métodos digitais de mapeamentos de solos devem auxiliar na tomada de decisão, mas não substituir os métodos tradicionais de levantamentos pedológicos.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L.A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, 519-529, 2007.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, 1151-1159, 2002.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **A bacia hidrográfica do Acaraú**. Fortaleza, 2009. Disponível em: <<http://portal.cogerh.com.br/eixos-de-atuacao/gestao-participativa/comites-de-bacias/comite-da-bacia-hidrografica-do-acarau>>. Acesso em: 10 mai. 2009.

DINIZ, S.F.; MOREIRA, C.A.; CORRADINI, F.A. Susceptibilidade erosiva do baixo curso do Rio Acaraú-CE. **Geociências**, v.27, 355-367, 2008.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. 209p.

EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995. 101 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006, 306 p.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

KUMAR, S.; LAL, R.; LIU, D. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock. **Geoderma**, v.189-190, 627-634, 2012.

LAGACHERIE, P.; LEGROS, J.P.; BURROUGH, P.A. A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. **Geoderma**, v.65, 283-301, 1995.

LAGACHERIE, P.; ROBBEZ-MASSON, J.M.; NGUYEN-THE, N.; BARTHÈS, J.P. Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscapes distance. **Geoderma**, v.101, 105-118, 2001.

LAGACHERIE, P.; BAILLY, J.S.; MONESTIEZ, P. Using scattered hyperspectral imagery data to map the soil properties of a region. **European Journal of Soil Science**, v. 63, 110-119, 2012.

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; JACOMINE, P.T.K.; ROMERO, R.E.; LIBARDI, P.L. Identificação e caracterização de solos coesos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, 467-476, 2004.

MA, Z.; REDMOND, R.L. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.61, 453-439, 1995.

MCBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, 3-52, 2003.

MCKENZIE, N.J.; RYAN, P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v.89, 67-94, 1999.

MELO, A.A.B. Distribuição espacial de alguns atributos de um argissolo amarelo sob diferentes manejos no perímetro irrigado do Baixo Acaraú – CE. 76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Ceará, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto Rio Acaraú. Mapa Geológico. Brasília: DNPM, 1973. Escala: 1:250.000.

MOTA, L.H.S.O. **Dinâmica de uso e riscos ambientais das terras do Baixo Acaraú – CE**. 154f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Ceará, 2011.

MOTA, L.H.S.O.; VALLADARES, G.S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v.42, 39-50, 2011.

NOVAES FILHO, J.P.; COUTO, E.G.; OLIVEIRA, V.A.; JOHNSON, M.S.; LEHMAN, J.; RIHA, S.S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, 91-100, 2007.

ODEH, I.O.A.; MCBRATNEY, A.B.; CHITTLEBOROUGH, D.J. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. **Geoderma**, v.67, 215-226, 1995.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição de coleta de solo no campo**. Viçosa: SBCS, 2005. 100p.

SOBRINHO, J. F. A compartimentação geomorfológica do Vale do Acaraú: distribuição das águas e pequeno agricultor. **Mercator** - Revista de Geografia da UFC, v.5, 91-110, 2006.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. **Ciência Rural**, v.41, 1170-1176, 2011.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, 45-94, 1985.

VALLADARES, G.S.; HOTT, M.C. The use of GIS and digital elevation model in digital soil mapping – A case study from São Paulo, Brazil. In: HARTENINK, A.E.; MCBRATNEY, A., MENDONÇA-SANTOS, M.L. (Eds.) **Digital soil mapping with limited data**. New York: Springer, 2008, p.349-356.

VALLADARES, G.S.; AZEVEDO, E.C.; CAMARGO, O.A.; GREGO, C.R.; RASTOLDO, A.M.C.S. Variabilidade espacial e disponibilidade de cobre e zinco em solos de vinhedo e adjacências. **Bragantia**, v.68, 733-742, 2009.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. Tópicos em Ciência do Solo, v.1, 1-54, 2000.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.A.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W.D. **Handbook for Geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters**. Tópicos em Ciência do Solo, v.2, 1-45, 2002.

WALTER, C.; McBRATNEY, A.B.; DOUAOUI, A.; MINASNY, B. Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif Valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. **Australian Journal of Soil Research**, v.39, 259-272, 2001.

WENDROTH, O.; REYNOLDS, W.D.; VIEIRA, S. R.; REICHARDT, K.; WIRTH, S. Statistical Approaches to the Analysis of Soil Quality Data. In Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.) **Soil Quality for Crop Production**. New York: Elsevier, 1997, p. 247-76.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise especial de atributos químicos do solo para o mapeamento da fertilidade do solo**. 114p. Tese de livre docência (Faculdade de Ciências Agrônômicas) Universidade Estadual Paulista. 2001.