

EMANOEL DI TARSO DOS SANTOS SOUSA

**ESTABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA CULTIVADA COM CAFÉ PARA
DEFINIÇÃO DE CLASSES DE MANEJO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S725e
2015
Sousa, Emanuel Di Tarso dos Santos, 1984-
Estabilidade espaço-temporal de atributos físicos e
químicos do solo em área cultivada com café para definição de
classes de manejo / Emanuel Di Tarso dos Santos Sousa. –
Viçosa, MG, 2015.
ix, 74f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.50-56.

1. Agricultura de precisão. 2. Condutividade elétrica.
3. Ciência do solo. 4. Café - Cultivo. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

EMANOEL DI TARSO DOS SANTOS SOUSA

**ESTABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA CULTIVADA COM CAFÉ PARA
DEFINIÇÃO DE CLASSES DE MANEJO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de julho de 2015.

Igor Rodrigues de Assis

Geice Paula Villibor

Domingos Sárvio Magalhães Valente
(Presidente da Banca)

Aos meus pais o Sr. Manoel Lucas e Sra. Maria Auxiliadora, aos meus irmãos Emanuela, Erick, Erika e Ericsson. Aos meus sobrinhos Cauan e Thor. A todos meus familiares e amigos.

DEDICO

“São as nossas escolhas, mais do que as nossas capacidades, que mostram quem realmente somos.”
(Alvo Dumbledore)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido saúde e vida para chegar até os dias de hoje lutando pelos meus ideais.

Agradeço também aos meus pais Manoel Lucas e Maria Auxiliadora por terem me criado e educado de maneira à sempre respeitar e ajudar o próximo quando necessário.

Agradeço também aos meus irmãos Emanuela, Erick, Erika e Ericsson pelos momentos marcantes compartilhados.

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo contínuo incentivo a lutar por algo melhor em minha vida.

A minha amiga e companheira Amélia, agradeço por todo o apoio e convívio.

Agradeço aos colegas do laboratório de mecanização agrícola pelo convívio, troca de experiências acadêmicas e auxílio em trabalhos.

Aos meus companheiros de coleta de dados e análise de solos, Diego, Grégory, Michael, Vítor e Ariane pela essencial ajuda. Sem o auxílio de vocês tudo teria sido muito mais complicado. Deixo aqui meu agradecimento. Muito obrigado a todos!!

Agradeço aos professores do DEA pelo conhecimento e experiência transmitidos.

Ao meu orientador Professor Daniel Marçal, agradeço pela orientação e ensinamentos.

Aos coorientadores Sárvio, Francisco e Fábio, agradeço os aconselhamentos.

Ao Délio, agradeço pela sempre agradável receptividade na secretaria do programa e esclarecimentos sobre os trâmites burocráticos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realizar o mestrado.

Ao Sr. Afonso, pela disponibilização da área na Fazenda Braúna para a realização da pesquisa.

ÍNDICE

RESUMO	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Classes de manejo.....	4
2.2. Métodos de geração de classes de manejo	6
2.3. Índice de moran bivariado	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1. Localização da área estudada.....	9
3.2. Caracterização do manejo da cultura e da área estudada.....	10
3.3. Georreferenciamento dos pontos de amostragem.....	10
3.4. Mensuração da condutividade elétrica aparente (CE _a) do solo .	11
3.5. Determinação dos atributos físico-químicos do solo.....	12
3.6. Análise de estatística descritiva e de detecção de amostras discrepantes do banco de dados	14
3.7. Caracterização da variabilidade espacial da CE _a e atributos do solo	14
3.8. Estabelecimento da correlação entre a CE _a e atributos do solo	15
3.9. Determinação da estabilidade temporal da CE _a	15
3.10. Definição das classes de manejo	16
3.11. Comparação entre as classes de manejo definidas	17

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1.	Análise descritiva dos dados obtidos em campo	20
4.2.	Caracterização da variabilidade espacial da CE_a e demais atributos do solo.....	24
4.3.	Análise de correlação da CE_a com as propriedades do solo	29
4.4.	Análise de estabilidade temporal da CE_a	35
4.5.	Definição das classes de manejo	36
4.6.	Comparação das classes de manejo ao longo do tempo	45
4.7.	Concordância das classes de manejo geradas com os atributos do solo.....	47
5.	CONCLUSÕES.....	49
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
7.	APÊNDICES	57

RESUMO

SOUSA, Emanuel Di Tarso dos Santos, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2015. **Estabilidade espaço-temporal de atributos físicos e químicos do solo em área cultivada com café para definição de classes de manejo.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente, Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Fábio Lúcio Santos.

O uso da agricultura de precisão na cafeicultura pode proporcionar a identificação do potencial produtivo e qualitativo de uma área, investigando possíveis fatores que influenciam na qualidade e produtividade. No entanto, para adotar da agricultura de precisão é necessário conhecimento sobre a variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo, e para isso é preciso uma amostragem densa e periódica, o que é oneroso. Como alternativa para baratear os custos com a amostragem de solo, por se relacionar com os atributos do solo, a condutividade elétrica aparente do solo tem sido utilizada para o mapeamento de áreas onde se deseja aplicar técnicas de agricultura de precisão. Assim, este estudo teve como objetivo analisar a estabilidade espacial e temporal da condutividade elétrica aparente do solo bem como sua relação com os atributos físicos e químicos do solo. O experimento foi realizado na Fazenda Braúna, no município de Araponga-MG, onde predomina o Latossolo Vermelho Amarelo. Foram utilizados dados dos atributos do solo coletados no ano de 2009 e 2015. Os mapas dos atributos do solo foram obtidos por meio da interpolação por krigagem. Observou-se que o padrão espacial de todos os atributos do solo foi influenciado pelo número de pontos amostrados. Com os mapas interpolados dos atributos do solo foi estabelecida a correlação entre a condutividade elétrica aparente e os atributos físicos e químicos do solo pelo Índice de Moran Bivariado. Os maiores valores desta correlação ocorreram no ano em que o solo estava mais úmido. As variações na magnitude das correlações obtidas no período estudado foram causadas pela diferença da umidade do solo, número de pontos amostrados e pela aplicação de fertilizantes em excesso. Entre 2009 e 2015, as classes de manejo definidas com base na condutividade elétrica aparente medida de 0 a 0,4 m de profundidade e altitude, com duas e três classes, foram as mais estáveis. As maiores concordâncias entre as classes de manejo geradas e os mapas dos atributos do solo ocorreram quando as

classes de manejo foram definidas com base nos dados de condutividade elétrica aparente mensurada de 0 a 0,4 m de profundidade e altitude.

ABSTRACT

SOUSA, Emanuel Di Tarso dos Santos, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2015. **Spatial-temporal stability of soil physical and chemical properties in an area cultivated with coffee for management class definition.** Advisor: Daniel Marçal de Queiroz. Co-Advisors: Domingos Sárvio Magalhães Valente, Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Fábio Lúcio Santos.

The use of precision agriculture in coffee production can help in identifying the productive and qualitative potential of an area, investigating possible factors that influence the quality and productivity. However, to adopt the precision agriculture you need the necessary knowledge about the spatial and temporal variability of soil attributes of the area. To do it, this requires dense and periodical sampling which can be a very costly action. An alternative method that will reduce the cost of soil sampling would be measure the apparent soil electrical conductivity as this has been used for mapping areas where they want to apply precision agriculture techniques, as they relate to the soil attributes. The rational of this study was to analyze the spatial and temporal stability of the apparent soil electrical conductivity and their relationship to the soil's physical and chemical properties. The experiment was conducted at Brauna Farm in the city of Araçuaia-MG, dominated the Typic Hapludox. The data of soil attributes used were from samples taken in 2009 and 2015. The maps of soil properties were obtained by kriging interpolation. It was observed that the spatial pattern of all soil attributes were influenced by the number of sampled points. The interpolated maps of soil attributes were used to obtain the spatial correlation between the apparent electrical conductivity and the soil's physical and chemical properties by bivariate Moran's Index. The highest values of this correlation were found to have occurred when the ground was at its wettest during the year. Variations in the magnitude of spatial correlations obtained during the study period may have been caused by the difference of soil moisture, number of sample points and the application of excess fertilizers. Between 2009 and 2015, management classes defined based on the apparent soil electrical conductivity measurement from 0 to 0.4 m depth and altitude area, with two and three classes were the most stable. The greatest concordance between the management classes generated and maps of soil attributes

occurred when management classes were defined based on the apparent electrical conductivity data measured from 0 to 0.4 m depth and altitude area.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma área de aproximadamente 2,3 milhões de hectares com cultivo de café, onde destes, 1,9 milhões encontram-se em plena produção. No estado de Minas Gerais está localizada a maior área de plantação de café do país, com 1,2 milhões de hectares de café, predominando a espécie *Coffea arábica* com 98,89 %, o que representa 53,89 % do total nacional. A segunda maior área pertence ao estado do Espírito Santo, com um total de aproximadamente 488 mil hectares, onde destes, 310 mil são da espécie *Coffea canephora* (conilon), o que confere ao estado o título de maior produtor desta espécie. Dentre as espécies de café cultivadas no país, o arábica corresponde a 72,4 % da produção total (CONAB, 2014).

Devido à grande exigência sobre a qualidade dos produtos e a necessidade de redução dos custos de produção, a adoção da agricultura de precisão pode ser a forma de gestão para atingir esses objetivos. A agricultura de precisão proporciona a aplicação de práticas agronômicas a sítio específico, como adubação, controle de plantas daninhas e controle de pragas, em função das informações compiladas a partir de dados coletados no campo (ORTEGA; SANTIBÁÑEZ, 2007). Aliado a isso, a diminuição do uso de insumos agrícolas e melhoria da eficiência da gestão agrícola e ambiental tornam-se motivação para adoção das tecnologias de agricultura de precisão (ZHANG et al., 2002).

No cultivo de café, a utilização das técnicas de agricultura de precisão pode proporcionar inúmeros benefícios, dentre os quais se destaca a identificação de áreas com maior potencial produtivo e qualitativo, podendo ser usada para determinar quais fatores influenciam a qualidade e produtividade (QUEIROZ et al., 2004; RODRIGUES Jr., 2008).

Para a adoção da agricultura de precisão é necessário o conhecimento acerca da variabilidade espacial e temporal das propriedades químicas e físicas do solo. Para obter informações detalhadas e confiáveis dessas propriedades, é necessária uma amostragem densa, o que acaba por onerar a aplicação do conceito de agricultura de precisão. Visando a redução do número de amostras, e conseqüentemente os custos, a definição

de classes de manejo tem se mostrado uma alternativa viável, uma vez que são áreas que apresentam características similares quanto aos fatores limitantes à produtividade e/ou qualidade do produto, possibilitando igual tratamento quanto à dosagem de insumo a ser aplicado.

Atualmente existem diversos métodos para se estabelecer classes de manejo. Alguns desses métodos baseiam-se em mapas de fertilidade do solo (SILVA et al., 2014), mapas de produtividade (SANTI et al., 2013), modelo digital de elevação (SILVA Jr. et al., 2012), mapas de matéria orgânica do solo (ALVES et al., 2013) e mapas de condutividade elétrica aparente do solo (KITCHEN et al., 2005; VALENTE et al., 2012). Existem casos em que os pesquisadores baseiam-se nos mapas das propriedades físicas do solo para a geração de classes de manejo (MORAL et al., 2010).

Pesquisas indicam a relevância assumida pelas características elétricas do solo para melhor entendimento sobre a variabilidade espacial da produtividade agrícola e das propriedades físico-químicas do solo (CORWIN; LESCH, 2003; CORWIN et al., 2003b; CORWIN; LESCH, 2005; LI et al., 2007a; LI et al., 2007b; VALENTE et al., 2012). Mediante essa indicação, a condutividade elétrica aparente do solo tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas para medições visando à caracterização da variabilidade espacial dos campos, devido à facilidade com que a medição é realizada, o baixo custo de obtenção e a confiabilidade dos dados gerados nessas medições (CORWIN; LESCH, 2003).

A estabilidade temporal das classes de manejo é um ponto significativo no que diz respeito à sua gestão específica, sendo esta, uma informação que produtores e agrônomos precisam estar cientes (TAYLOR et al., 2007). Se as classes de manejo mudam drasticamente à medida que novas camadas de dados são adicionadas, torna-se difícil o gerenciamento das classes com alguma confiança.

Para a geração de classes de manejo, o ideal é que as variáveis utilizadas apresentem baixo custo na aquisição dos dados e sejam estáveis tanto espacial quanto temporalmente, uma vez que a intenção de defini-las consiste no aproveitamento da área produtiva por intervalo de tempo considerável. Do ponto de vista operacional e econômico, não é interessante para os produtores modificar a localização das classes de manejo em curtos

intervalos de tempo. Devido a isso, é de suma importância que seja verificado o padrão da variabilidade das propriedades do solo usadas na definição de classes de manejo, dentre as quais se destaca a condutividade elétrica aparente do solo, que, segundo Valente (2010), combinada com a altitude são uma boa escolha para a definição de classes de manejo.

Existem vários estudos sobre variabilidade espaço temporal da condutividade elétrica (CORWIN; LESCH, 2005; LI et al., 2007; MOLIN; FAULIN, 2013; TERRÓN et al., 2013). No entanto, os períodos avaliados, de maneira geral, variam entre um e três anos de duração. Sendo assim, é importante que seja realizada uma pesquisa sobre a estabilidade da condutividade elétrica e demais propriedades do solo no espaço e no tempo em intervalos superiores aos estudados até o presente momento, tendo em vista que o café trata-se de uma cultura perene e tende a ser explorada por longos períodos. Dessa forma, no presente trabalho objetivou-se determinar a estabilidade temporal e espacial de atributos físicos e químicos de solo em áreas com cultivo convencional (aplicação de insumos à taxa fixa) de café no intervalo de julho de 2009 a fevereiro de 2015. Os objetivos específicos são:

- Caracterizar a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo e de outros atributos químicos e físicos do solo em duas épocas distintas separadas por um intervalo de cinco anos;
- Estabelecer a correlação entre a condutividade elétrica aparente e os atributos físicos e químicos do solo em duas épocas separadas por um intervalo de cinco anos;
- Analisar a variação da localização de classes de manejo delimitadas com base na condutividade elétrica aparente, definidas para duas épocas separadas por um intervalo de cinco anos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Classes de manejo

Na literatura sobre agricultura de precisão os termos “zonas de manejo” e “classes de manejo” são utilizados com frequência e de maneira alternada, com o mesmo significado. No entanto, estes termos não são sinônimos. Uma classe de manejo é uma área à qual um determinado tratamento deve ser aplicado. Já uma zona de manejo é uma área espacialmente contínua onde um determinado tratamento deve ser aplicado. Dessa forma, uma classe de manejo pode ser constituída de várias zonas de manejo, enquanto uma zona de manejo pode conter apenas uma classe de manejo (TAYLOR et al., 2007).

As classes de manejo podem ser definidas como partes de um campo que expressam uma combinação homogênea de fatores limitantes à produtividade, como textura, topografia e níveis de nutrientes, em que uma taxa única de insumos ou uma mesma intervenção específica da cultura é necessária (LI et al., 2007; MORAL et al., 2010).

O número de classes de manejo dentro de um campo é função da variabilidade natural da área, do tamanho da área, e de certos fatores de gerenciamento. O tamanho mínimo de uma classe é limitado pela capacidade de gestão diferenciada destas classes por parte do agricultor. Se um sistema de posicionamento global (GPS) está inserido para controlar a aplicação ou para orientar o implemento, não há razão para restrições sobre forma e tamanho das classes (ZHANG et al., 2002).

O conceito de classe de manejo pode ser compreendido como uma regressão a partir do conceito básico da agricultura de precisão. No entanto, as classes de manejo têm sua implantação facilitada. A remoção de detalhes excessivos na variabilidade dentro do campo simplifica as formas das classes, reduzindo assim os requisitos de equipamento para aplicação de insumos à taxa variada (ZHANG et al., 2002).

O manejo a sítio específico utilizando subáreas é uma alternativa para o gerenciamento da variabilidade dos solos e das culturas. Sendo assim, faz-se necessário a escolha de classes de manejo que proporcionem uma aplicação localizada eficiente de insumos. No entanto, mapas de atributos do

solo não são suficientemente precisos para o gerenciamento localizado e não há nenhuma maneira universal para determinar as classes de manejo, o que significa que a metodologia, bem como a informação usada para definição das classes de manejo deve ser bem estudada (KWEON, 2012).

Classes de manejo geralmente são definidas com base em informações do solo ao longo dos anos. No entanto, pesquisadores têm utilizado imagens aéreas, índices de vegetação e combinação de dados de produtividade e sensoriamento remoto para a criação de classes de manejo (AGGELOPOULOU; GEMTOS, 2011).

2.2. Métodos de geração de classes de manejo

Fu et al. (2010) definiram classes de manejo com base em seis nutrientes do solo. Para a geração das classes, estes pesquisadores utilizaram o algoritmo *Fuzzy Clustering* otimizado com o Particle Swarm Optimization (PSO) e determinaram o número ótimo de classes de manejo com base em dois índices, o coeficiente de separação F e a entropia da separação H . O resultado desta pesquisa indicou que utilização do *Fuzzy Clustering* otimizado com o PSO, teve um bom desempenho em definir classes de manejo para aplicação de adubação a taxa variável na área de estudo.

Aggelopoulou e Gemtos (2011), em estudo sobre a relação do mapa de produtividade com os atributos do solo sob cultivo de maçã na Grécia, definiram classes de manejo com base no mapa de produtividade com o auxílio do software Management Zones Analyst (MZA), que funciona pelo método *Fuzzy Clustering* (FRIDGEN et al., 2004). Estes pesquisadores utilizaram os *índices de performance fuzzy* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) para determinar o número ótimo de classes de manejo. Os pesquisadores observaram, ainda, que o mapa de produtividade tem bom potencial para ser utilizado na definição de classes de manejo no pomar em questão, visto a concordância que o mapa de produtividade apresentou com as propriedades do solo que explicitam as necessidades nutricionais das árvores.

Peralta et al. (2015) definiram classes de manejo com base em dados da condutividade elétrica aparente do solo, elevação do terreno e profundidade do solo, utilizando o algoritmo *fuzzy k-means* para gerar as classes de manejo. Para determinar o número ótimo de classes, os pesquisadores utilizaram os *índices de performance fuzzy* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE). Neste estudo, Peralta et al. (2015) tiveram como objetivo avaliar a influência da delimitação de classes de manejo na melhora de gestão do nitrogênio em campos de trigo na Argentina. Como resultado da pesquisa, os autores observaram que a resposta das plantas à adubação nitrogenada foi melhor nas classes de manejo.

2.3. Índice de Moran Bivariado

O Índice de Moran Bivariado é uma medida de associação que os valores de uma variável observada em uma dada região guardam com os valores de outra variável observada em regiões vizinhas. Esta associação pode ser verificada a nível global, que consiste numa análise para toda a área estudada, mas também pode ser observada a nível local, analisando-se microrregiões específicas da área total (ALMEIDA, 2012). Os índices de Moran bivariado em termos globais e locais de associação linear podem ser conflitantes, indicando assim, que as estatísticas globais não têm a capacidade de identificar a ocorrência de associação espacial a nível local que seja estatisticamente significativa. Dessa forma, também é importante a utilização dos indicadores locais bivariado de associação espacial (BiLISA). O índice de Moran Local faz uma decomposição do indicador global, e deve indicar associação local significativa, com o somatório de todos os indicadores locais sendo proporcional ao indicador global (DIAS; ALVES, 2011).

Os valores positivos do Índice de Moran Global Bivariado indicam que, de maneira geral, valores altos de uma variável tendem a estar rodeados de valores altos da segunda variável correlacionada, bem como valores baixos de uma variável tendem a estar rodeados de valores baixos da segunda variável que está sendo associada. Enquanto valores negativos do Índice de Moran Global Bivariado significam que regiões com altos valores de uma variável tendem a estar rodeados de baixos valores da variável correlacionada ou valores baixos de uma variável circundados por valores altos da outra variável associada (ALMEIDA, 2012).

O diagrama de dispersão de Moran Bivariado plota os valores de uma variável observada numa determinada região no eixo das abscissas, e os valores da outra variável observada em regiões vizinhas no eixo das ordenadas. Na Figura 1 é apresentado um exemplo de diagrama de dispersão de Moran Bivariado, resultado da correlação entre a produtividade média do setor agrícola estimada no ano de 1997 (PME97) e no ano de 2003 (W_N5) por Perobelli et al. (2007).

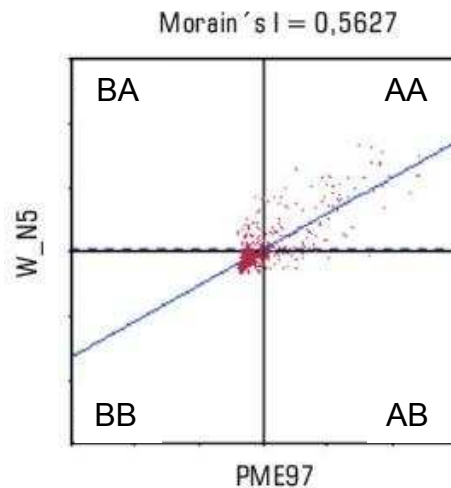


Figura 1. Diagrama de dispersão de Moran Bivariado. (Fonte: PEROBELLI et al., 2007).

O diagrama de dispersão de Moran (Figura 1) é dividido em quatro quadrantes (PEROBELLI et al., 2007). Esses quadrantes correspondem a quatro padrões de associação local espacial entre as regiões e seus vizinhos. O primeiro quadrante, classificado como Alto-Alto (AA), mostra as regiões que apresentam altos valores para a uma variável, cercadas por regiões que também apresentam valores altos para a segunda variável observada. O segundo quadrante, nomeado como Baixo-Alto (BA), mostra as regiões com valores baixos de uma variável, cercadas por vizinhos com valores altos da outra variável. O terceiro quadrante, rotulado como Baixo-Baixo (BB), é constituído pelas regiões com valores baixos de uma variável, cercadas por vizinhos que também apresentam baixos valores. O quarto quadrante, classificado como Alto-Baixo (AB), é formado pelas regiões com altos valores para uma variável, cercadas por regiões com baixos valores da segunda variável (ALMEIDA, 2012).

A significância do índice de Moran Global e Local é verificada por um teste de pseudosignificância, com base em permutações randômicas dos valores dos atributos associados às regiões, onde cada permutação produz novo arranjo espacial dos valores redistribuídos entre as áreas, sendo sua significância obtida a partir de uma distribuição empírica do índice de Moran. Se o valor do índice de Moran medido corresponder a um “extremo” da distribuição simulada, então se trata de um evento com significância estatística (ARAÚJO et al., 2014).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área estudada

Os dados de campo foram coletados na Fazenda Braúna, que fica localizada no município de Araponga – MG. A escolha da fazenda Braúna se deu pelo fato desta possuir banco de dados com histórico entre 2004 e 2009, que possibilitou a realização do presente estudo. A propriedade possui uma área de 306 ha, onde destes, 86 ha são cultivados com café da espécie *Coffea arábica L.*

A área onde há cultivo de café é dividida em talhões onde as plantas se encontram em diferentes fases de desenvolvimento (Figura 2). Dentre elas, foi selecionada uma área de 20 ha onde, anteriormente, Valente (2010) realizou trabalho semelhante e que também possibilita melhor trânsito entre as linhas de cultivo para a coleta de dados, uma vez que neste talhão as plantas são mais jovens e possuem copas menores.

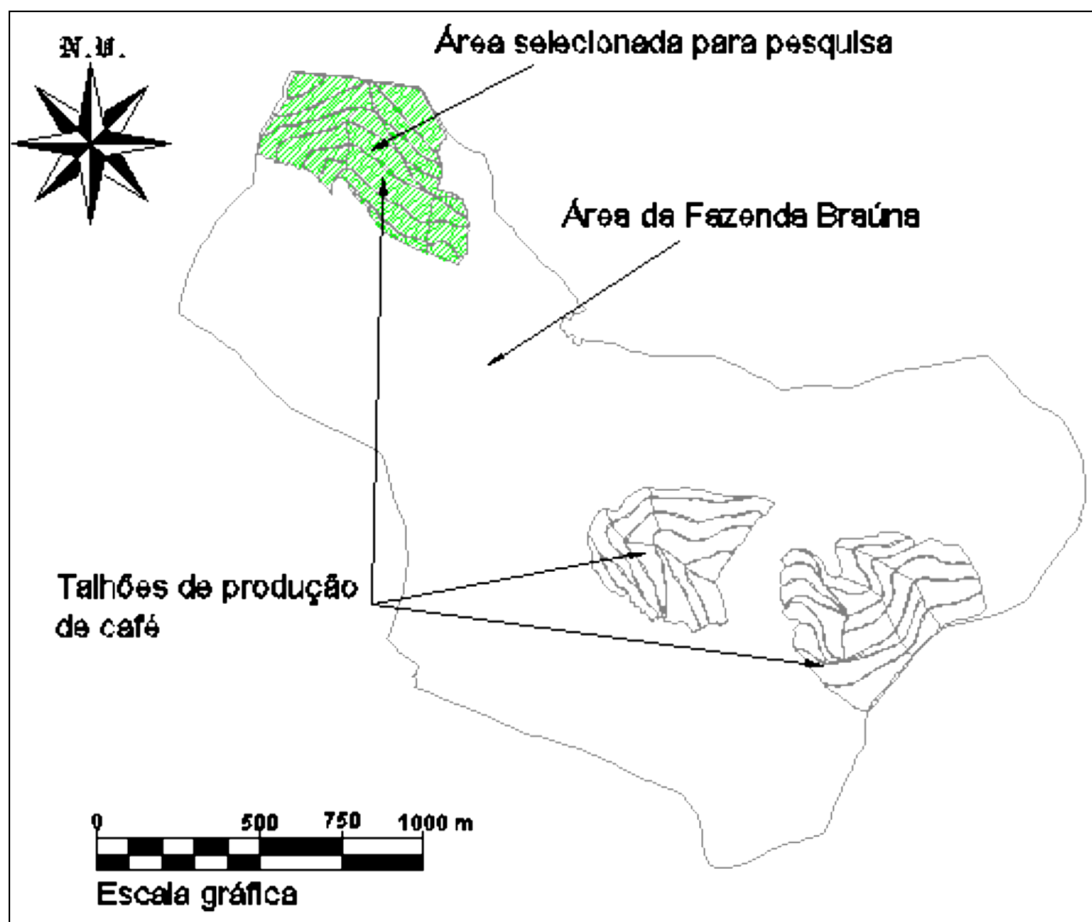


Figura 2. Localização das áreas de produção de café na Fazenda Braúna, Araponga-MG. (Fonte: VALENTE, 2010).

3.2. Caracterização do manejo da cultura e da área estudada

Com intuito de reproduzir as condições de manejo do café encontradas por Valente (2010) em julho de 2009, buscou-se realizar a coleta de amostras de solo em fevereiro de 2015 em condições similares as de 2009. Quanto à aplicação de insumos, a cultura implantada na área experimental vem sendo manejada convencionalmente desde o ano de 2009. Ou seja, a aplicação de insumos tem sido à taxa fixa e com a mesma dosagem. Em julho de 2009 a coleta de amostras ocorreu antes da adubação e depois da colheita. Este procedimento foi repetido também em fevereiro de 2015. Quanto à topografia e pedologia da área experimental, a mesma apresenta relevo montanhoso com altitude média de 904 m, e predominância de solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo.

3.3. Georreferenciamento dos pontos de amostragem

Em 2009, seguindo uma amostragem sistematizada, Valente (2010) georreferenciou 141 pontos amostrais. Em 2015, a localização dos pontos de amostragem e medições da condutividade elétrica aparente (CE_a) do solo na área também foram conduzidas seguindo uma distribuição sistematizada. Tal distribuição foi realizada buscando obedecer a uma distância média entre pontos de 25 m, sempre acompanhando as linhas de cultivo, o que resultou em 275 pontos amostrados (Figura 3). Os pontos amostrais foram georreferenciados utilizando um GPS Topográfico (L1), da marca Trimble, modelo Pro XT (TRIMBLE NAVIGATION LIMITED, USA).

Os dados de posicionamento dos pontos amostrados foram submetidos à correção diferencial pós-processada com o auxílio do software GPS Pathfinder Office® v. 5.00 fornecido pelo fabricante do aparelho GPS, utilizando dados para correção diferencial disponibilizados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBCM) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que possui base localizada no município de Viçosa-MG. Assim como no georreferenciamento feito por Valente (2010), o datum utilizado foi o SAD69.

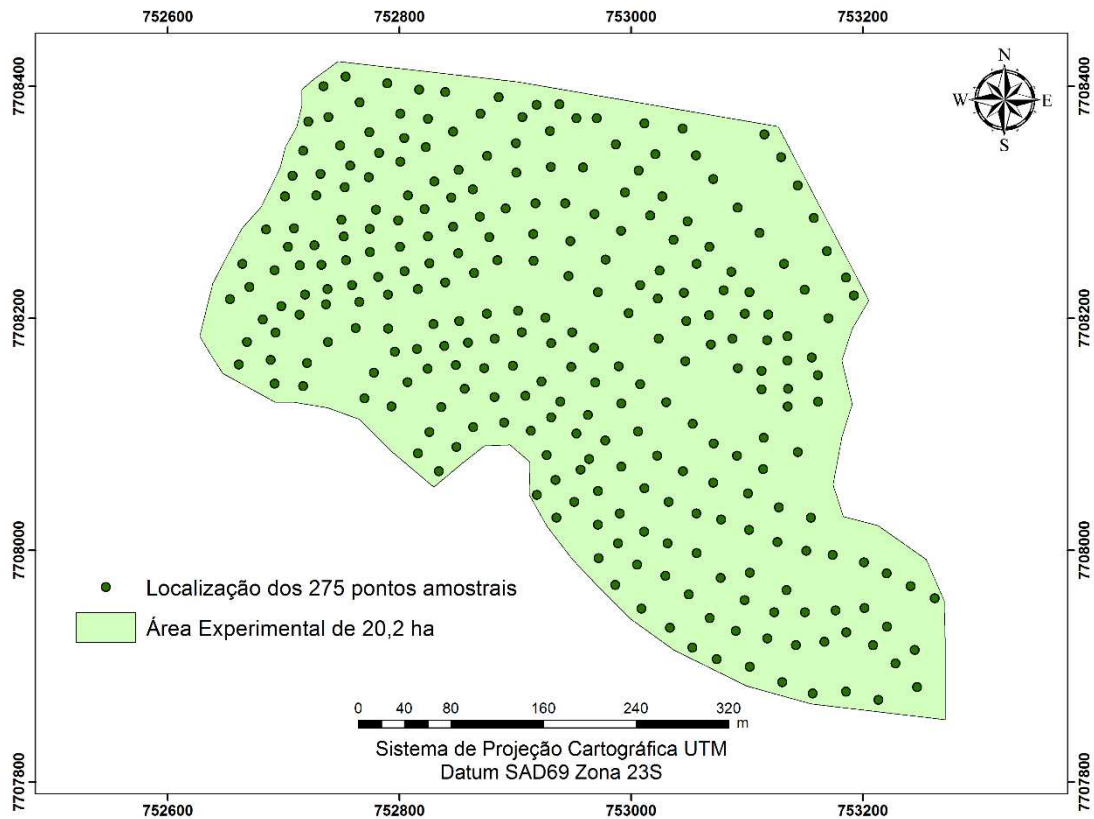


Figura 3. Mapa de distribuição dos pontos de amostragem.

3.4. Mensuração da condutividade elétrica aparente (CE_a) do solo

Os dados de condutividade elétrica aparente (CE_a) foram obtidos com o uso do aparelho portátil modelo LandMapper® ERM-02, fabricado pela Landviser®. Este aparelho utiliza o princípio da resistividade elétrica (RE), que é medida por meio do contato de quatro eletrodos com o solo. Os eletrodos foram configurados de acordo com a *Matriz de Wenner*. Segundo descrito por Corwin e Lesch (2003), essa é uma configuração na qual os eletrodos são dispostos em linha, igualmente espaçados, onde uma corrente elétrica é aplicada nos dois eletrodos externos e os eletrodos internos medem a diferença de potencial (Figura 4).

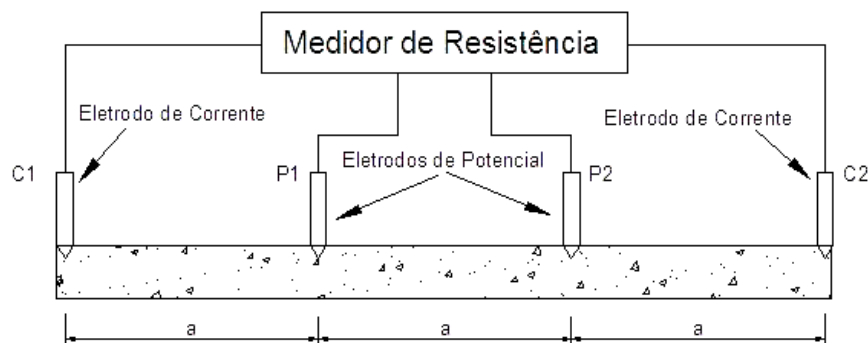


Figura 4. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos: dois eletrodos de corrente (C1 e C2) e dois eletrodos potenciais (P1 e P2) (CORWIN; LESCH, 2003).

Para o presente estudo, foram utilizadas duas configurações de *Matriz de Wenner*, uma com 0,20 m e outra com 0,40 m de espaçamento entre os eletrodos, proporcionando assim, a mensuração da CE_a nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0 a 0,40 m, respectivamente. Para a fixação dos eletrodos nas configurações citadas anteriormente, foram utilizadas hastes confeccionadas com tubos de PVC.

3.5. Determinação dos atributos físico-químicos do solo

Cada ponto amostrado foi composto por duas amostras simples, que foram coletadas em um raio de um metro em torno do ponto de determinação da condutividade elétrica. As amostras de solo foram submetidas à análise de rotina, onde foram determinados os teores disponíveis de fósforo (P) e potássio (K), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) pelo extrator Mehlich-1 (MEHLICH, 1984). Os teores trocáveis de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) foram determinados por meio do extrator KCl (1 mol L⁻¹). A acidez potencial (H+Al) foi determinada por meio do extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L à pH 7,0. A percentagem de matéria orgânica (MO) foi determinada pelo método Walkley-Black. O fósforo remanescente (P.rem) foi determinado por meio de solução de CaCl₂ (10 mmol L⁻¹). O pH foi determinado a partir da solução solo-água (1:2,5) em suspensão, por meio de potenciômetro com eletrodo combinado. A condutividade elétrica da solução solo-água na proporção de 1:5 (CE) foi determinada por meio de condutímetro de leitura direta. Para obter os dados de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica

efetiva (CTC efetiva), capacidade de troca catiônica à pH 7 (CTC a pH 7), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) realizou-se o cálculo conforme descrito no manual de métodos de análise de solo da EMBRAPA (EMBRAPA, 1997). A determinação dos dados relativos à granulometria (areia grossa, areia fina, silte e argila) foi realizada pelo método da agitação lenta com dispersante químico NaOH, seguida de peneiramento para retirada da fração de areia total, sedimentação da silte e secagem a 105 °C (RUIZ, 2005a; RUIZ, 2005b).

A umidade do solo foi determinada utilizando o sensor portátil FieldScout TDR 300, devidamente calibrado conforme recomendações do fabricante (Spectrum Technologies, Aurora, IL). Para uma melhor precisão, realizou-se uma calibração específica para o tipo de solo estudado. Dessa forma, em amostras do solo saturadas, foram realizadas medições periódicas com o sensor portátil FieldScout TDR 300, que foram expostas a secagem ao ar até a estabilização do peso do solo úmido. A cada medição da umidade com o sensor realizou-se uma pesagem da massa de solo úmido. Após a estabilização do peso do solo úmido este foi seco em estufa a 105 °C durante 24 horas e pesado novamente (EMBRAPA, 1997; Spectrum Technologies, Aurora, IL).

Por fim, realizou-se a plotagem de um gráfico com os dados de umidade gravimétrica em função dos dados de umidade volumétrica, obtidos nas leituras realizadas com sensor portátil FieldScout TDR 300. Dessa forma, uma análise de regressão pôde ser realizada a fim de se obter uma equação para converter a umidade volumétrica, dada na leitura do sensor utilizado, para a umidade gravimétrica (Spectrum Technologies, Aurora, IL).

3.6. Análise de estatística descritiva e de detecção de amostras discrepantes do banco de dados

O conjunto de dados foi submetido a uma análise prévia para verificar a existência de possíveis dados discrepantes. Foi considerado possível *outlier* (valor discrepante) aquela observação que, em valor absoluto, é superior à média somada três vezes o desvio padrão e inferior à média subtraído de três vezes o desvio padrão (BARNETT; LEWIS, 1994). A remoção ou não dessa observação discrepante foi realizada após verificar se as amostras vizinhas não assumiam comportamento semelhante àquela considerada discrepante. Nesse caso, o dado não era descartado.

Após análise de *outlier*, o conjunto de dados foi submetido à análise estatística descritiva. Para verificar a hipótese de igualdade estatística entre as médias de cada atributo obtidas entre os anos de 2009 e 2015 realizou-se o teste T ao nível de 5% de significância.

3.7. Caracterização da variabilidade espacial da CE_a e atributos do solo

A variabilidade espacial da condutividade elétrica e dos atributos físico-químicos do solo foi caracterizada com dados referentes a dois períodos distintos, com intervalo de cinco anos entre eles. Os dados referentes ao primeiro período foram coletados por Valente (2010), no período de 7 a 9 de julho de 2009. O segundo período de coleta de dados foi de 22 a 26 de fevereiro de 2015.

Para realizar a caracterização da variabilidade espacial da CE_a e demais atributos do solo referente aos anos de 2009 e 2015, foi utilizado o software GS+ versão 9.0 (Gamma Design Software, Plainwell, MI), no qual foi obtido o modelo espacial para cada um destes atributos.

Os modelos espaciais escolhidos como de melhor ajuste aos dados experimentais foram aqueles que apresentaram maior coeficiente de determinação (R^2) e menor valor para a soma do quadrado dos resíduos (SQR). Escolhidos os modelos ajustados, estes foram então usados no procedimento de krigagem ordinária, para a estimativa dos valores dos atributos nos locais não amostrados. A partir dos parâmetros dos

semivariogramas ajustados com os melhores modelos espaciais, foi verificada a ocorrência de dependência espacial para os atributos analisados. O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado por meio da Equação 1. De acordo com Zimback (2001), a dependência espacial pode ser considerada como: fraca quando o IDE é menor ou igual a 25 %, moderada quando o IDE se encontra entre 25 e 75 %, e forte quando o IDE é maior de 75 %.

$$IDE = \frac{C}{C + C_0} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

IDE - Índice de dependência espacial, (%);

C - Variância estrutural; e

C + C₀ - Patamar.

3.8. Estabelecimento da correlação entre a CE_a e atributos do solo

A análise de correlação dos dados de condutividade elétrica aparente nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0 a 0,40 m com os atributos químicos e composição granulométrica do solo foi estabelecida pelo Índice de Moran Bivariado tanto Global como Local (BiLISA), que foram obtidos com auxílio do software livre (código aberto) GeoDa™ (ANSELIN et al., 2005). Esta análise foi realizada para os conjuntos de dados obtidos em julho de 2009 e fevereiro de 2015. Dessa forma, foi possível verificar se existe correlação entre a condutividade elétrica aparente em diferentes profundidades com as demais propriedades do solo nos períodos distintos, e caso tenha existido em 2009, se a mesma manteve-se em 2015, após cultivo convencional (aplicação de insumos à taxa fixa) de café.

3.9. Determinação da estabilidade temporal da CE_a

A análise de correlação entre dados mensurados em datas consecutivas descreve a persistência do padrão espacial ao longo do tempo, sendo que quanto mais próximo de um for essa correlação, maior será a estabilidade da variável analisada (MORETI et al., 2007). Dessa forma, a verificação da estabilidade temporal dos dados foi realizada por meio da

correlação entre os valores de CE_a mensurados nos dois períodos estudados. Tal correlação entre os dados obtidos nas diferentes datas foi determinada também pelo Índice de Moran Bivariado (ANSELIN et al., 2005).

3.10. Definição das classes de manejo

As classes de manejo (CM's) foram definidas com base nos dados de altitude, condutividade elétrica aparente de 0 a 0,20 m de profundidade, condutividade elétrica aparente de 0 a 0,40 m de profundidade, umidade e teor de argila do solo. Desta forma, visando gerar classes de manejo com base nas mesmas informações que as geradas por Valente (2010), as combinações das informações para o estabelecimento das classes de manejo foram as seguintes:

- Classe de Manejo com base na Altitude (CMA);
- Classe de Manejo com base na CE20 (CM20);
- Classe de Manejo com base na CE40 (CM40);
- Classe de Manejo com base na CE20 e Altitude (CM20A);
- Classe de Manejo com base na CE40 e Altitude (CM40A);
- Classe de Manejo com base na CE20, Umidade e Teor de Argila (CM20UTarg);
- Classe de Manejo com base na CE40, Umidade e Teor de Argila (CM40UTarg).

Cada uma das classes de manejo citadas anteriormente foi definida com 2, 3, 4 e 5 classes. Para estimar o número ótimo de classes, as CM's foram comparadas entre si pelo Índice de Performance Fuzzy (*Fuzziness Performance Index* - FPI) e Entropia da Partição Modificada (Modified Partition Entropy - MPE). O número ótimo de classes é aquele em que os dois índices supracitados apresentam valores mínimos (SONG et al., 2009).

Para a definição das CM's propostas neste item, foi utilizado o programa computacional KRIG-ME, desenvolvido por Valente (2010). Este software foi concebido com a implementação do algoritmo *fuzzy k-means*, descrito por Minasny e McBratney (2006), onde também foi inserido um algoritmo para realizar o cálculo dos índices FPI e MPE.

3.11. Comparação entre as classes de manejo definidas

Com intuito de verificar a ocorrência de uma possível modificação na localização das classes de manejo geradas em períodos distintos com um intervalo de cinco anos, os mapas dessas classes de manejo foram comparados entre si por meio do coeficiente de concordância *Kappa*. Esse coeficiente indica o quanto os mapas se parecem, com base em níveis de concordância.

Para a estimativa do *Kappa*, a partir da matriz de erro ou matriz de confusão, foi utilizada a equação 2 (CONGALTON, 1991). A matriz de confusão foi obtida após a classificação dos pixels pelo programa KRIG-ME (VALENTE, 2010).

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i})}{n^2 - \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i})} \quad (2)$$

Em que,

\hat{K} - Estimativa do coeficiente *Kappa*;

x_{ii} - Valor na linha i e coluna i (diagonal) da matriz de confusão;

$x_{i\oplus}$ - Total da linha i da matriz de confusão;

$x_{\oplus i}$ - Total da coluna i da matriz de confusão;

n - Número total de amostras;

c - Número total de classes.

Para testar se os coeficientes *Kappa* obtidos foram significativos, foi realizada a estatística Z ao nível de 5 % de significância, na qual foi utilizada a equação 3 (CONGALTON; MEAD, 1986).

$$Z = \frac{\hat{K}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2(\hat{K})}} \quad (3)$$

Em que,

Z - Estatística Z padronizada e normalmente distribuída;

$\hat{\sigma}^2$ - Variância do coeficiente *Kappa*.

O cálculo da variância do coeficiente *Kappa* foi realizado por meio da equação 4, conforme apresentado por Bishop et al. (1975) citados por Hudson e Ramm (1987).

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_1)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2-\theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4-4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (4)$$

Em que,

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c x_{ii} ; \quad (5)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i}) ; \quad (6)$$

$$\theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c x_{ii} (x_{i\oplus} + x_{\oplus i}) ; \quad (7)$$

$$\theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c x_{ij} (x_{j\oplus} + x_{\oplus j})^2 . \quad (8)$$

Para verificar a diferença entre dois coeficientes *Kappa* independentes ao nível de 5 % de significância, foi utilizada a equação 9 (CONGALTON; MEAD, 1986).

$$Z = \frac{\hat{K}_1 - \hat{K}_2}{\sqrt{\hat{\sigma}(\hat{K}_1) + \hat{\sigma}(\hat{K}_2)}} \quad (9)$$

Em que,

Z = Estatística Z padronizada e normalmente distribuída;

\hat{K}_1 e \hat{K}_2 = Coeficientes *Kappa* que foram comparados;

$\hat{\sigma}$ = Variância do coeficiente *Kappa*.

Para verificar o nível de concordância entre os mapas das classes de manejo definidas em períodos distintos, os coeficientes *Kappa* obtidos nas comparações foram classificados de acordo com a Tabela 1 (LANDIS; KOCH, 1977).

Tabela 1. Escala de concordância de acordo com o valor de *Kappa*

<i>Kappa</i>	Nível de Concordância
< 0	Muito Ruim
0 – 0,20	Ruim
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Boa
0,61 – 0,80	Muito Boa
0,81 – 1	Excelente

Fonte: (LANDIS; KOCH, 1977).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise descritiva dos dados obtidos em campo

Antes da análise estatística descritiva, verificou-se a presença de valores considerados discrepantes em relação aos demais, seguindo a metodologia proposta por Barnett e Lewis (1994). Tal análise foi realizada para todas as variáveis estudadas, conforme pode-se verificar na Tabela 2. A detecção desses valores discrepantes é vital para a consistência e integridade do banco de dados (HODGE; AUSTIN, 2004).

Tabela 2. Resultados da análise de valores discrepantes no conjunto de dados coletados em 2015

Variável	Nº Total de amostras	Nº de Valores discrepantes
Altitude (m)	275	0
CE _a 20 ¹ (mS m ⁻¹)	275	5
CE _a 40 ² (mS m ⁻¹)	275	3
Umidade (kg kg ⁻¹)	275	1
pH ³	275	2
Fósforo (P) (mg dm ⁻³)	275	6
Potássio (K ⁺) (mg dm ⁻³)	275	3
Cálcio (Ca ²⁺) (cmol _c dm ⁻³)	275	2
Magnésio (Mg ²⁺) (cmol _c dm ⁻³)	275	1
Acidez trocável (Al ⁺³) (cmol _c dm ⁻³)	275	2
Acidez Potencial (H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	275	0
Soma de Bases (SB) (cmol _c dm ⁻³)	275	2
CTC ⁴ efetiva (cmol _c dm ⁻³)	275	2
CTC ⁴ a pH 7 (cmol _c dm ⁻³)	275	1
Saturação por bases (V) (%)	275	0
Saturação por Alumínio (m) (%)	275	1
Matéria Orgânica (MO) (dag kg ⁻¹)	275	2
Fósforo Remanescente (P-Rem) (mg L ⁻¹)	275	2
Zinco (Zn) (mg dm ⁻³)	275	3
Ferro (Fe) (mg dm ⁻³)	275	4
Manganês (Mn) (mg dm ⁻³)	275	5
Cobre (Cu) (mg dm ⁻³)	275	4
CE ⁵ 1:5 (mS m ⁻¹)	275	3
Areia Grossa (kg kg ⁻¹)	275	1
Areia Fina (kg kg ⁻¹)	275	1
Silte (kg kg ⁻¹)	275	4
Argila (kg kg ⁻¹)	275	0
Resistência do solo a Penetração (MPa)	275	4

¹Condutividade Elétrica Aparente do solo de 0 a 0,20 m de profundidade/
²Condutividade Elétrica Aparente do solo de 0 a 0,40 m de profundidade / ³Acidez Ativa em água / ⁴Capacidade de Troca de Cátions/ ⁵Condutividade Elétrica (1:5).

Os valores médios obtidos para CE_a20 e CE_a40 no ano de 2015 foram 1,72 e 1,53 mS m⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Valores próximos aos obtidos por Valente (2010), que em estudo realizado na mesma área, obtiveram médias de 1,80 para CE_a20 e 1,44 mS m⁻¹ para CE_a40, no ano de 2009. Essa pequena oscilação nos valores das CE_a's mensuradas em 2009 e 2015 pode ter ocorrido devido a diferença entre as condições de umidade do solo encontradas em cada ano. Entre solos secos e úmidos a diferença entre valores mensurados de CE_a pode ser de até 20 % (SERRANO et al., 2013).

Tabela 3. Estatística descritiva dos dados em 2009 e 2015

Variável	Média		Mínimo		Máximo		Coeficiente de Variação (%)	
	2009	2015	2009	2015	2009	2015	2009	2015
Altitude (m)	913,95 ^A	895,43 ^B	854,29	834,38	979,14	970,05	3,90	4,09
CE _a 20 ¹ (mS m ⁻¹)	1,80 ^A	1,72 ^A	0,40	0,16	5,24	4,04	48,16	44,72
CE _a 40 ² (mS m ⁻¹)	1,22 ^A	1,53 ^B	0,40	0,18	3,45	3,99	43,28	47,04
Umidade (kg kg ⁻¹)	0,31 ^A	0,28 ^B	0,21	0,20	0,42	0,39	12,40	12,94
pH ³	5,76 ^A	5,58 ^B	4,83	4,25	7,74	7,10	8,63	9,99
P ⁴ (mg dm ⁻³)	4,36 ^A	5,26 ^B	1,10	1,40	22,10	15,00	57,90	49,21
K ⁵ (mg dm ⁻³)	89,21 ^A	153,02 ^B	17,00	39,00	165,00	325,00	35,94	37,31
Ca ⁶ (cmol _c dm ⁻³)	2,70 ^A	2,90 ^A	0,43	0,38	9,22	7,78	44,66	93,30
Mg ⁷ (cmol _c dm ⁻³)	1,21 ^A	1,22 ^A	0,21	0,16	3,71	2,98	39,52	53,64
Al ⁸ (cmol _c dm ⁻³)	0,20 ^A	0,40 ^B	0,00	0,00	1,17	1,80	135,95	116,87
H+Al ⁹ (cmol _c dm ⁻³)	7,44 ^A	8,31 ^B	0,50	1,30	12,70	14,50	32,92	36,01
SB ¹⁰ (cmol _c dm ⁻³)	4,13 ^A	4,52 ^A	0,74	0,80	11,51	10,37	38,89	50,67
t ¹¹ (cmol _c dm ⁻³)	4,33 ^A	4,93 ^B	1,71	1,90	11,51	10,37	33,30	39,43
T ¹² (cmol _c dm ⁻³)	11,57 ^A	12,90 ^B	5,62	7,66	16,27	17,64	16,50	14,69
V ¹³ (%)	36,75 ^A	36,27 ^A	6,50	6,90	94,50	89,50	42,41	52,76
m ¹⁴ (%)	6,43 ^A	12,41 ^B	0,00	0,00	59,10	60,50	155,02	127,68
M. O ¹⁵ (dag kg ⁻¹)	5,42 ^A	5,75 ^B	2,50	2,56	7,96	9,78	18,93	19,21
P-Rem ¹⁶ (mg L ⁻¹)	19,26 ^A	15,18 ^B	11,30	5,80	31,60	27,40	21,64	28,02
Zn ¹⁷ (mg dm ⁻³)	2,05 ^A	2,10 ^A	0,35	0,44	5,75	5,96	57,21	53,27
Fe ¹⁸ (mg dm ⁻³)	45,13 ^A	84,72 ^B	18,80	30,30	120,30	171,90	37,87	34,44
Mn ¹⁹ (mg dm ⁻³)	9,26 ^A	9,08 ^A	2,30	1,90	42,30	27,60	61,94	56,13
Cu ²⁰ (mg dm ⁻³)	0,86 ^A	1,28 ^B	0,10	0,14	2,88	3,83	61,25	56,07
CE ²¹ 1:5 (mS m ⁻¹)	5,00 ^A	8,54 ^B	4,00	4,39	9,00	15,36	16,71	25,19
Areia Grossa (kg kg ⁻¹)	26,78 ^A	27,24 ^A	17,00	17,00	41,00	39,00	16,41	14,51
Areia Fina (kg kg ⁻¹)	12,16 ^A	11,14 ^B	7,00	7,00	20,00	17,00	15,59	17,23
Silte (kg kg ⁻¹)	7,49 ^A	9,07 ^B	4,00	3,67	15,00	21,98	27,30	45,00
Argila (kg kg ⁻¹)	53,57 ^A	52,48 ^A	39,00	36,43	66,00	67,41	9,14	12,14
Resist. Pen. (MPa)	-	1,692	-	0,746	-	4,316	-	38,99

¹Condutividade Elétrica Aparente do solo a 0,20 m de profundidade/ ²Condutividade Elétrica Aparente do solo a 0,40 m de profundidade / ³Acidez Ativa em água / ⁴Fósforo/ ⁵Potássio/ ⁶Cálcio/ ⁷Magnésio/ ⁸Alumínio (Acidez trocável)/ ⁹Acidez potencial/ ¹⁰Soma de bases/ ¹¹Capacidade de Troca de Cátions efetiva/ ¹²Capacidade de Troca de Cátions a pH 7/ ¹³Saturação por bases/ ¹⁴Saturação por alumínio/ ¹⁵Matéria Orgânica/ ¹⁶Fósforo remanescente/ ¹⁷Zinco/ ¹⁸Ferro/ ¹⁹Manganês/ ²⁰Cobre/ ²¹Condutividade Elétrica (1:5).

Os valores do coeficiente de variação tanto da CE_{a20} , que foi 44,72 %, como da CE_{a40} , que foi 47,04 %, obtidos em 2015, foram próximos aos encontrados por Valente (2010), que obteve 48,16 % e 43,28 %, respectivamente. A redução no coeficiente de variação da CE_{a20} entre 2009 e 2015 ocorreu devido a diferença na umidade do solo. Molin e Faulin (2013), analisando a estabilidade espacial e temporal da CE_a por dois anos, obtiveram maior valor de CV para a CE_a quando a área estudada apresentou maior umidade do solo.

A umidade do solo observada na área de estudo variou de 0,20 a 0,39 $kg\ kg^{-1}$ em 2015, enquanto Valente (2010) encontrou a umidade variando de 0,21 a 0,42 $kg\ kg^{-1}$ no ano de 2009, em estudo realizado na mesma área. Estatisticamente, as médias da umidade encontradas em 2009 e 2015 foram distintas ao nível de 5 % de significância. Essa diferença nas umidades obtidas em diferentes épocas está diretamente relacionada ao fato de que em dezembro de 2014 o café plantado na área foi submetido a uma poda drástica (recepta), o que reduziu a área sombreada do solo, deixando-o assim mais exposto à radiação solar e, portanto, susceptível a maior evaporação.

Os valores de pH em solução aquosa do solo (1:2,5 - mistura de uma parte de solo para duas e meia de água destilada) obtidos em 2015, foram semelhantes aos encontrados por Valente (2010), que obteve pH de 5,76. Os valores de pH obtidos tanto em 2009 quanto em 2015 foram próximos da faixa ideal de acidez para solos destinados à produção de café, uma vez que solos com pH entre 5,8 e 6,2 proporcionam melhor disponibilidade de nutrientes para a cultura (OLIVEIRA et al., 2012).

Quanto aos atributos químicos do solo, ao se confrontar os valores de fósforo e potássio obtidos por Valente (2010) em 2009 com os valores obtidos em 2015, pode-se observar que houve um pequeno incremento no teor médio de fósforo, que passou de 4,36 $mg\ dm^{-3}$ em 2009 para 5,26 $mg\ dm^{-3}$ em 2015. Já para o potássio observou-se um salto considerável no teor médio, passando de 89,21 $mg\ dm^{-3}$ para 153,02 $mg\ dm^{-3}$ no mesmo período. Esse aumento no teor de potássio pode ter ocorrido devido à aplicação em excesso deste nutriente na adubação, que foi conduzida a taxa fixa entre 2009 e 2015. A disponibilidade de potássio conferia ao solo da área

classificação de “média” fertilidade em 2009, passando a “boa” fertilidade em 2015 (OLIVEIRA et al., 2012). Tanto em 2009 quanto em 2015, os teores de fósforo obtidos foram considerados muito baixos para uma nutrição adequada do cafeeiro (RIBEIRO et al., 1999).

Para os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), soma de bases (SB), saturação por bases (V), zinco (Zn) e manganês (Mn) obtidos em 2015, não houve diferença estatística entre as médias dos teores desses atributos obtidos por Valente (2010) em 2009 e a médias dos teores desses mesmos atributos obtidos em 2015.

Quanto à magnitude dos valores de acidez trocável (Al^{3+}) e saturação por alumínio (m), houve um aumento considerável nos teores médios, já que praticamente dobraram seus valores. Este aumento no teor de alumínio trocável deve se a amostragem em locais com alta concentração deste atributo no solo, locais estes que não foram amostrados em 2009.

Os teores de ferro (Fe) e cobre (Cu) obtidos em 2015, quando comparados aos resultados obtidos por Valente (2010) em 2009, também sofreram um aumento relevante nos seus teores médios, passando de 45,13 e 0,86 mg dm^{-3} para 84,72 e 1,28 mg dm^{-3} , respectivamente.

Em relação aos atributos físicos do solo, os valores médios de areia grossa e argila, obtidos em 2015, não diferiram estatisticamente dos valores médios obtidos em 2009, o que já era esperado, uma vez que a área de estudo não passou por sistematização de terras ou erosões de grandes proporções para propiciar a mobilização em massa das camadas superficiais do solo. No entanto, devido à amostragem realizada em 2015 ter ocorrido em locais antes não amostrados em 2009, por causa do número de pontos amostrados, houve uma pequena diferença, porém significativa, entre os teores médios de areia fina e silte obtidos entre 2009 e 2015.

4.2. Caracterização da variabilidade espacial da CE_a e demais atributos do solo

Os maiores alcances (A) observados entre os atributos avaliados em 2015 foram para o pH, altitude, resistência do solo a penetração, cobre, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica a pH 7 (Tabela 4). Já os menores alcances (A) observados foram nos atributos manganês, condutividade elétrica aparente do solo na camada de 0 a 0,20 m de profundidade, cálcio, fósforo e capacidade de troca catiônica efetiva.

Os alcances dos semivariogramas ajustados para as CE_a 's obtidos em 2015 foram inferiores aos obtidos por Valente (2010) em 2009. Essa diferença pode ter sido causada pelas umidades distintas obtidas em cada ano. Para um mesmo solo, os ajustes na interpolação na geração de mapas da CE_a tendem a ser melhores quando a umidade do solo for maior, ou seja, apresentam maiores alcances para solos mais úmidos (NASCIMENTO et al., 2014).

Quanto a existência de dependência espacial, pôde-se verificar que os maiores Índices de Dependência Espacial (IDE) ocorreram para altitude, capacidade de troca catiônica efetiva, cálcio, soma de bases e CE_{a20} com IDE de 100; 90,8; 90,7; 90,5 e 89,6 % respectivamente. De acordo com a classificação de Zimback (2001), estes atributos possuem forte dependência espacial, já que possuem IDE maior que 75 %.

Vale ressaltar que todos os alcances obtidos nos semivariogramas de cada atributo avaliado foram superiores à distância média entre as amostras no campo, que foi de aproximadamente 25 m. Dessa forma, constata-se que o esquema de amostragem de solo adotado foi suficiente para detectar a existência de dependência espacial da maioria das variáveis analisadas, com exceção da variável silte que apresentou efeito pepita puro (VIEIRA et al., 2007). Os semivariogramas com os modelos espaciais ajustados para cada uma das variáveis podem ser verificados no Apêndice A e os gráficos das validações cruzadas para as interpolações realizadas podem ser visualizados no Apêndice B.

Tabela 4. Parâmetros dos modelos teóricos de semivariância ajustados para os dados de 2009 e 2015

Variáveis	Modelo		Alcance (A)		Patamar (C0+C)		Efeito Pepita (C0)		IDE (C/(C0+C))		SQR		R ²	
	2009	2015	2009	2015	2009	2015	2009	2015	2009	2015	2009	2015	2009	2015
Altitude (m)	Gau. ⁷	Gau.	338,27	379,32	1818,89	2012	21,60	1	0,988	1	105322	38772	0,983	0,995
CE _{a20} ¹ (mS m ⁻¹)	Esf. ⁸	Exp. ⁹	230,25	42,90	0,833	0,588	0,451	0,061	0,458	0,896	5,10E-25	9,0E-3	0,775	0,716
CE _{a40} ² (mS m ⁻¹)	Esf.	Exp.	223,20	94,80	0,313	0,504	0,139	0,252	0,557	0,501	8,68E-32	9,8E-3	0,806	0,804
Umidade (kg kg ⁻¹)	Gau.	Esf.	193,44	169,55	1,6E-3	1,3E-3	5,0E-4	1,0E-3	0,707	0,231	1,00E-63	0,4E-8	0,951	0,711
pH ³	Gau.	Exp.	68,59	585	0,240	0,376	0,160	0,184	0,334	0,511	3,04E-35	0,3E-4	0,566	0,984
Fósforo (P) (mg dm ⁻³)	Exp.	Exp.	336,44	55,80	8,12	6,795	1,96	0,870	0,759	0,872	19,86	2,630	0,615	0,487
Potássio (K) (mg dm ⁻³)	Exp.	Esf.	346,91	139,02	1089,9	3300,6	352,32	2184,2	0,677	0,338	25639	206122	0,947	0,758
Cálcio (Ca ²⁺) (cmol _c dm ⁻³)	Gau.	Exp.	49,64	53,40	1,444	2,583	0,744	0,241	0,485	0,907	7,30E-2	0,096	0,692	0,773
Magnésio (Mg ²⁺) (cmol _c dm ⁻³)	Exp.	Exp.	88,2	65,40	0,222	0,427	0,017	0,070	0,923	0,836	2,00E-36	2,0E-3	0,838	0,630
Acidez trocável (Al ³⁺) (cmol _c dm ⁻³)	Exp.	Exp.	371,4	169,80	0,078	0,231	0,039	0,114	0,501	0,502	3,93E-41	1,0E-3	0,742	0,859
Acidez Potencial (H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	Exp.	Esf.	77,32	208,70	6,13	9,85	1,67	4,920	0,727	0,501	1,731	1,180	0,706	0,956
Soma de Bases (SB) (cmol _c dm ⁻³)	Exp.	Exp.	58,50	62,10	2,519	5,143	0,215	0,490	0,915	0,905	0,21	0,501	0,755	0,798
t ⁴ efetiva (cmol _c dm ⁻³)	Exp.	Exp.	57,90	60,30	2,054	3,693	0,197	0,340	0,904	0,908	0,154	0,459	0,729	0,683
T ⁴ a pH 7 (cmol _c dm ⁻³)	Gau.	Esf.	168,89	253,70	3,93	4,160	2,38	1,627	0,394	0,609	1,87	0,257	0,659	0,967
Saturação por bases (V) (%)	Exp.	Esf.	46,80	173,58	236,50	372,05	19,50	264,18	0,918	0,290	2635	1326	0,563	0,895
Saturação por Alumínio (m) (%)	Exp.	Exp.	62,10	155,56	91,30	265,81	5,40	127,09	0,941	0,522	1913	2530	0,311	0,753
Matéria Orgânica (MO) (dag kg ⁻¹)	Esf.	Esf.	199,00	289,50	1,118	1,398	0,435	0,624	0,611	0,554	9,30E-21	5,2E-2	0,856	0,979
Fósforo Remanescente (P-Rem) (mg L ⁻¹)	Esf.	Exp.	270,90	160,80	18,96	18,97	8,045	5,480	0,576	0,711	32,10	4,990	0,785	0,956
Zinco (Zn) (mg dm ⁻³)	Esf.	Exp.	352,60	130	1,75	1,287	0,56	0,732	0,682	0,431	0,10	2,03E-2	0,947	0,836
Ferro (Fe) (mg dm ⁻³)	Gau.	Exp.	406,80	212,70	515,10	910,1	103,00	455	0,800	0,500	1620	23429	0,979	0,808
Manganês (Mn) (mg dm ⁻³)	Esf.	Exp.	430,89	36,30	43,52	26,25	17,94	3,150	0,588	0,880	139,10	11,3	0,843	0,313
Cobre (Cu) (mg dm ⁻³)	Esf.	Esf.	365,68	300,40	0,337	0,588	0,158	0,237	0,532	0,597	1,75E-32	4,1E-3	0,959	0,986
CE ⁵ 1:5 (mS m ⁻¹)	Esf.	Exp.	79,24	103,30	0,851	4,830	0,307	2,370	0,640	0,509	97,9E-3	0,376	0,678	0,819
Areia Grossa (kg kg ⁻¹)	Esf.	Esf.	283,74	228,60	22,05	17,25	4,28	6,520	0,806	0,622	48,39	5,030	0,876	0,967
Areia Fina (kg kg ⁻¹)	Esf.	Gau.	262,90	224,47	4,01	4,004	0,63	1,760	0,844	0,560	0,52	0,143	0,966	0,985
Silte (kg kg ⁻¹)	Gau.	EPP ⁶	205,04	-	4,49	-	2,91	-	0,353	-	0,45	-	0,903	-
Argila (kg kg ⁻¹)	Esf.	Exp.	246,5	201	27,45	42,75	2,35	21,37	0,914	0,500	41,80	34,50	0,953	0,878
Resistência do solo a Penetração (MPa)	-	Exp.	-	328,5	-	0,494	-	0,207	-	0,581	-	1,18E-3	-	0,981

¹ Condutividade Elétrica Aparente do solo de 0 a 0,20 m de profundidade/ ² Condutividade Elétrica Aparente do solo de 0 a 0,40 m de profundidade/ ³ Acidez Ativa em solução aquosa/ ⁴ Capacidade de Troca Catiônica/ ⁵ Condutividade Elétrica (1:5)/ ⁶ Efeito pepita puro/ ⁷ Gaussiano/ ⁸ Esférico/ ⁹ Exponencial.

Na Figura 5 estão apresentados os mapas de variabilidade espacial dos atributos utilizados na definição das classes de manejo, obtidos por meio da metodologia de interpolação krigagem de dados referentes ao ano 2009 e 2015. Os mapas dos demais atributos encontram-se no Apêndice D.

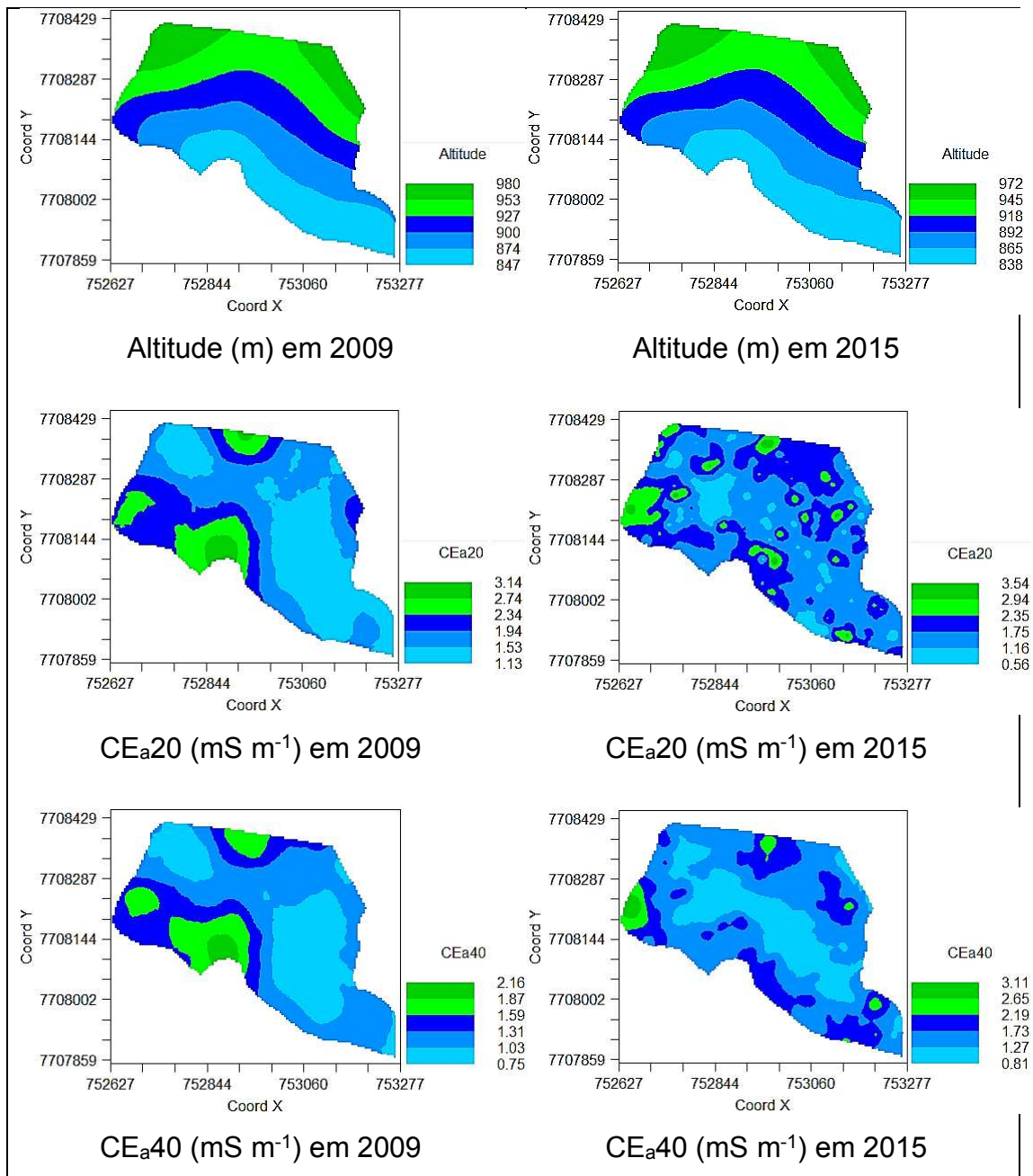


Figura 5. Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo.

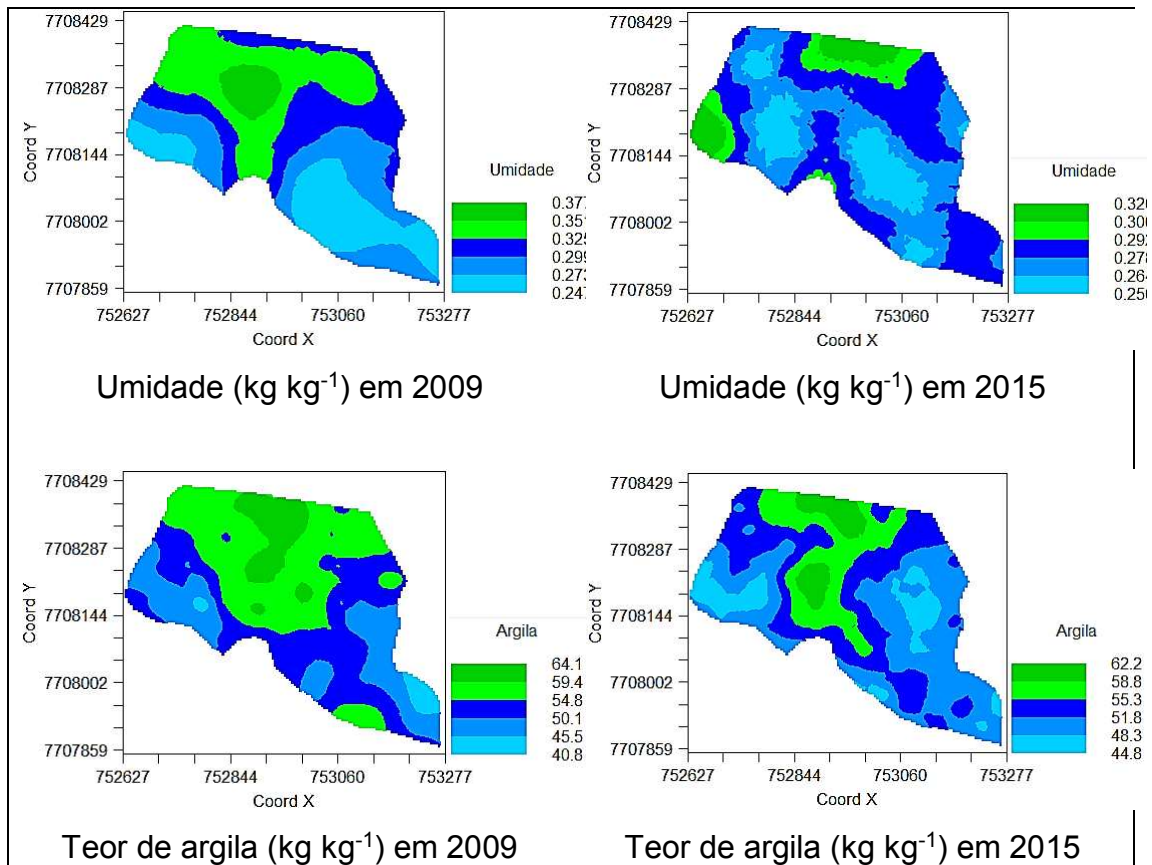


Figura 5. (Continuação) 1 - Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo.

Os mapas de CE_a gerados apresentaram semelhança entre si e entre os mapas de alguns atributos como umidade, cálcio, magnésio, fósforo remanescente, soma de bases e capacidade de troca de cátions efetiva. Sendo destaque a similaridade entre os mapas das condutividades elétricas mensuradas em diferentes profundidades, conforme já observado por Valente (2010). A semelhança entre os mapas das CE_a 's e dos atributos indica a possibilidade de correlação espacial da CE_a com estes atributos.

A menor continuidade espacial observada nos mapas gerados em 2015 pode ser reflexo da baixa umidade do solo no momento da medição das CE_a 's, uma vez que a umidade afeta diretamente o alcance dos semivariogramas da CE_a . Percebe-se também que esta menor continuidade do padrão espacial é ainda mais evidente no mapa da CE_{a20} , pois esta é mais afetada pela variação das condições de umidade nas camadas superficiais. Nascimento et al. (2014) observaram que quanto maior a umidade do solo, melhores foram os ajustes nas interpolações e geração de mapas da CE_a . Estes pesquisadores verificaram que quando a umidade foi

maior os alcances dos semivariogramas ajustados para CE_a também foram maiores, indicando assim uma maior continuidade espacial da CE_a com o solo mais úmido.

Outro fator que implica na variação do padrão espacial dos mapas gerados nos anos de 2009 e 2015 é a quantidade de pontos amostrados em cada ano. Quando se aumenta o número de pontos amostrados em uma mesma área, a tendência é obter maior detalhamento da variabilidade espacial. A alteração no número de pontos amostrados implica ainda na redução do alcance dos semivariogramas e também em modificação na escolha do modelo espacial que melhor se ajusta aos dados (SOUZA et al., 2014). Daí a explicação para a variação nos resultados de ajustes nos semivariogramas e geração dos mapas em 2009 e 2015, e isso se aplica a todos os atributos analisados. Sendo assim, percebe-se que tanto a umidade quanto o número de pontos amostrados influenciam na variação do padrão espacial dos mapas dos atributos, o que indica que para análise de estabilidade do padrão espacial com o passar do tempo o ideal é que a localização e a quantidade de pontos de amostragem sejam sempre os mesmos durante todo o período de avaliação. Pôde-se perceber também que, para a avaliação da estabilidade do padrão espacial da condutividade elétrica aparente (CE_a) do solo, a localização, o número de pontos amostrados e a umidade do solo também devem ser os mesmos durante todo o período de avaliação, sendo que o ideal é que a mensuração da CE_a seja realizada com o solo úmido.

4.3. Análise de correlação da CE_a com as propriedades do solo

Dentre todos os atributos analisados entre os anos de 2009 e 2015, observa-se que entre os três maiores valores do índice de Moran obtidos, dois foram para a correlação entre as CE_{a20} e CE_{a40}, com índice de Moran igual a 0,964 em 2009 e 0,668 em 2015. Quando as CE_a's foram correlacionadas com os demais atributos, observou-se que os maiores valores do índice de Moran bivariado foram obtidos nas correlações entre CE_{a40} e potássio em 2009, CE_{a40} e umidade em 2015, CE_{a20} e potássio em 2009, e CE_{a40} e CE_{a20} com o atributo fósforo remanescente, em 2009 (Tabela 5).

Tabela 5. Índice de Moran Bivariado entre condutividade elétrica aparente do solo e demais propriedades do solo

Variável	Índice de Moran Bivariado (<i>I</i>) ¹			
	2009		2015	
	CE _{a20}	CE _{a40}	CE _{a20}	CE _{a40}
Altitude (m)	-0,120	-0,162	0,149	0,012
CE _{a20} ² (mS m ⁻¹)	1	0,964	1	0,668
CE _{a40} ³ (mS m ⁻¹)	0,964	1	0,668	1
Umidade (kg kg ⁻¹)	0,169	0,174	0,571	0,658
pH ⁴	-0,047	-0,063	0,396	0,314
Fósforo (P) (mg dm ⁻³)	0,333	0,333	-0,138	-0,179
Potássio (K) (mg dm ⁻³)	0,652	0,674	0,363	0,471
Cálcio (Ca ²⁺) (cmol _c dm ⁻³)	0,219	0,241	0,460	0,400
Magnésio (Mg ²⁺) (cmol _c dm ⁻³)	0,099	0,071	0,467	0,455
Acidez trocável (Al ³⁺) (cmol _c dm ⁻³)	0,005	0,067	-0,396	-0,358
Acidez Potencial (H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	-0,070	-0,034	-0,416	-0,446
Soma de Bases (SB) (cmol _c dm ⁻³)	0,210	0,218	0,479	0,436
CTC ⁵ efetiva (cmol _c dm ⁻³)	0,236	0,254	0,463	0,429
CTC ⁵ a pH 7 (cmol _c dm ⁻³)	0,128	0,173	-0,126	-0,181
Saturação por bases (V) (%)	0,165	0,162	0,455	0,461
Saturação por Alumínio (m) (%)	-0,160	-0,115	-0,408	-0,411
Matéria Orgânica (MO) (dag kg ⁻¹)	-0,170	-0,158	-0,184	-0,349
Fósforo Remanescente (P-Rem) (mg L ⁻¹)	0,628	0,638	0,505	0,600
Zinco (Zn) (mg dm ⁻³)	0,315	0,351	0,222	0,404
Ferro (Fe) (mg dm ⁻³)	-0,182	-0,124	-0,120	0,028
Manganês (Mn) (mg dm ⁻³)	0,565	0,570	0,348	0,496
Cobre (Cu) (mg dm ⁻³)	0,243	0,238	0,104	0,360
CE ⁶ 1:5 (mS m ⁻¹)	0,093	0,084	0,210	0,021
Areia Grossa (kg kg ⁻¹)	-0,130	-0,118	-0,116	-0,180
Areia Fina (kg kg ⁻¹)	-0,134	-0,150	0,151	0,310
Silte (kg kg ⁻¹)	0,280	0,273	0,094	0,205
Argila (kg kg ⁻¹)	0,075	0,079	-0,017	-0,079
Resistência do solo a Penetração (MPa)	-	-	0,200	0,414

¹Índice de Moran Global Bivariado; pseudo p-valor < 0.05 com 999 permutações/ ²Condutividade Elétrica Aparente do solo a 0,2m de profundidade / ³Condutividade Elétrica Aparente do solo a 0,4m de profundidade/ ⁴Acidez Ativa em solução aquosa/ ⁵Capacidade de Troca Catiônica/ ⁶Condutividade Elétrica (1:5).

Em relação aos dados de 2009, Valente (2010) observou que, embora a CE_{a40} tenha sido mensurada em camada de solo mais profunda que a amostragem do solo, esta apresentou as maiores correlações em relação a CE_{a20} , para a maioria dos atributos. Tal fato pode ter sido causado devido a maior exposição das camadas superficiais do solo à radiação solar, o que provocaria maior variação da umidade e conseqüentemente da CE_{a20} , resultando em uma menor correlação com os atributos.

Para os dados de 2015, verificou-se que essa tendência de maiores valores de correlação da CE_{a40} com os atributos se manteve para um número menor de atributos, se comparada a CE_{a20} . No entanto, as correlações da CE_{a40} com os atributos, em geral, foram mais estáveis, ou seja, sofreram menor variação em relação aos dados de 2009, quando comparados com a CE_{a20} . Este resultado era esperado, uma vez que a CE_{a40} é mensurada em uma camada mais profunda, sendo assim menos susceptível a influência do meio externo.

As maiores diferenças entre os valores de correlação entre os atributos estabelecida em 2009 e 2015 foram verificadas para CE_{a20} quando correlacionada com as variáveis pH, fósforo, alumínio, manganês e acidez potencial e para CE_{a40} quando correlacionada com o fósforo, areia fina, alumínio e acidez potencial. A variação na correlação das CE_a 's com esses atributos está diretamente relacionada com a variação nos teores destes atributos, causada pela diferença nas localizações dos pontos de amostragem de solo em 2009 e 2015.

Para as correlações significativas e positivas obtidas no ano de 2015, os maiores valores de Índice de Moran Bivariado foram obtidos para a correlação da CE_{a40} com umidade, fósforo remanescente e manganês. Ao comparar as correlações entre as CE_a 's e a umidade em 2009 e 2015, percebe-se que a correlação entre estes aumentou, o que é normal, visto que a CE_a apresenta maior correlação com a umidade quando o solo encontra-se mais seco (COSTA et al., 2014). Para as correlações significativas e negativas, os maiores valores do Índice de Moran obtidos foram quando a correlação foi estabelecida entre as CE_a 's com acidez potencial, saturação por alumínio e alumínio (acidez trocável). Este resultado se deve ao aumento significativo dos teores de alumínio, provocado pela

amostragem em locais com altos teores deste atributo em 2015 e que eventualmente não foram amostrados em 2009.

Na Figura 6 estão apresentados os mapas de agrupamentos com os chamados indicadores locais de associação espacial entre duas variáveis (BiLISA - Bivariate Local Indicator of Spatial Association), que neste caso, ilustram o comportamento da correlação espacial local, estatisticamente significativa, entre a CE_a20 e os atributos mais importantes na nutrição do cafeeiro, obtidos em 2015. A área em vermelho nos mapas representam agrupamentos do tipo Alto-Alto, que significam locais de alto valores da CE_a rodeados de altos valores dos demais atributos. Em azul estão representados os agrupamentos do tipo Baixo-Baixo, que significam baixos valores da CE_a rodeados de baixos valores dos outros atributos. Enquanto em lilás e rosa estão representados os agrupamentos do tipo Baixo-Alto e Alto-Baixo, respectivamente, significando que locais com baixos valores de CE_a estão circundados por locais com altos valores dos outros atributos e vice versa.

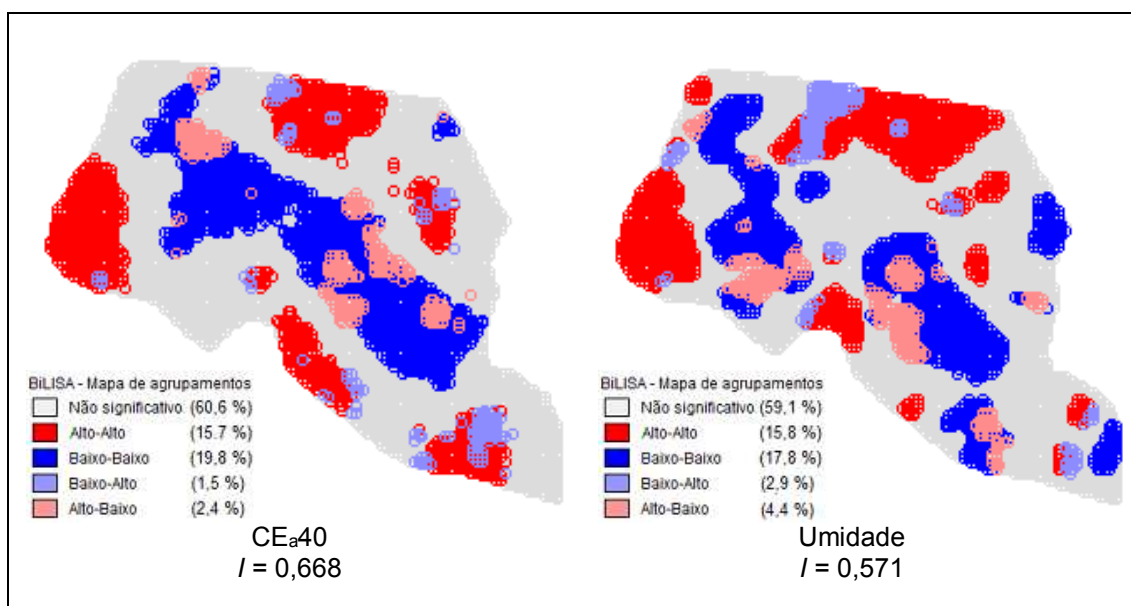


Figura 6. Mapas de clusters da correlação espacial entre CE_a20 e os atributos do solo pelo Índice de Moran Global Bivariado.

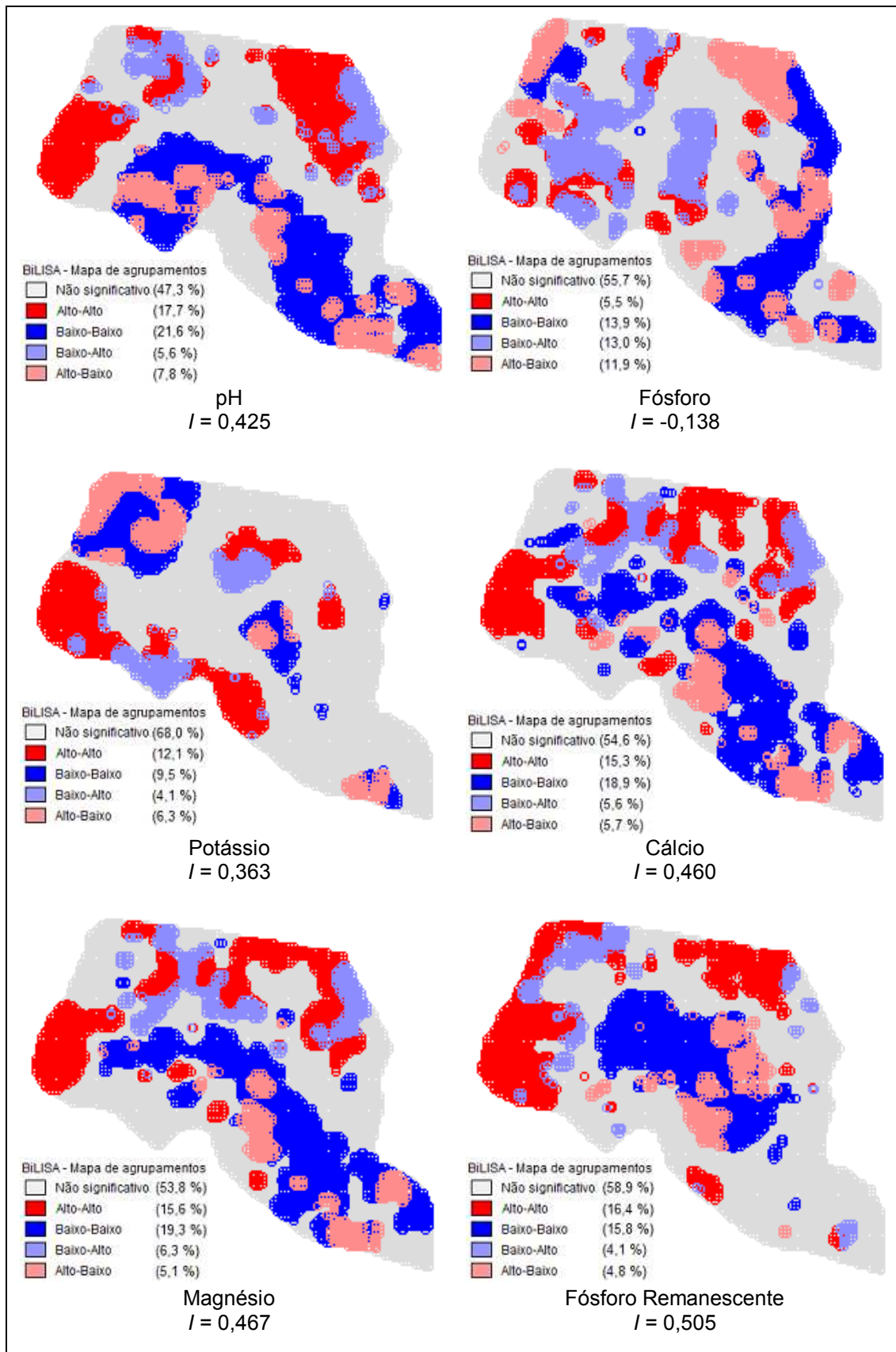


Figura 6. (Continuação) 1 - Mapas de clusters da correlação espacial entre CE_{a20} e os atributos do solo pelo Índice de Moran Global Bivariado.

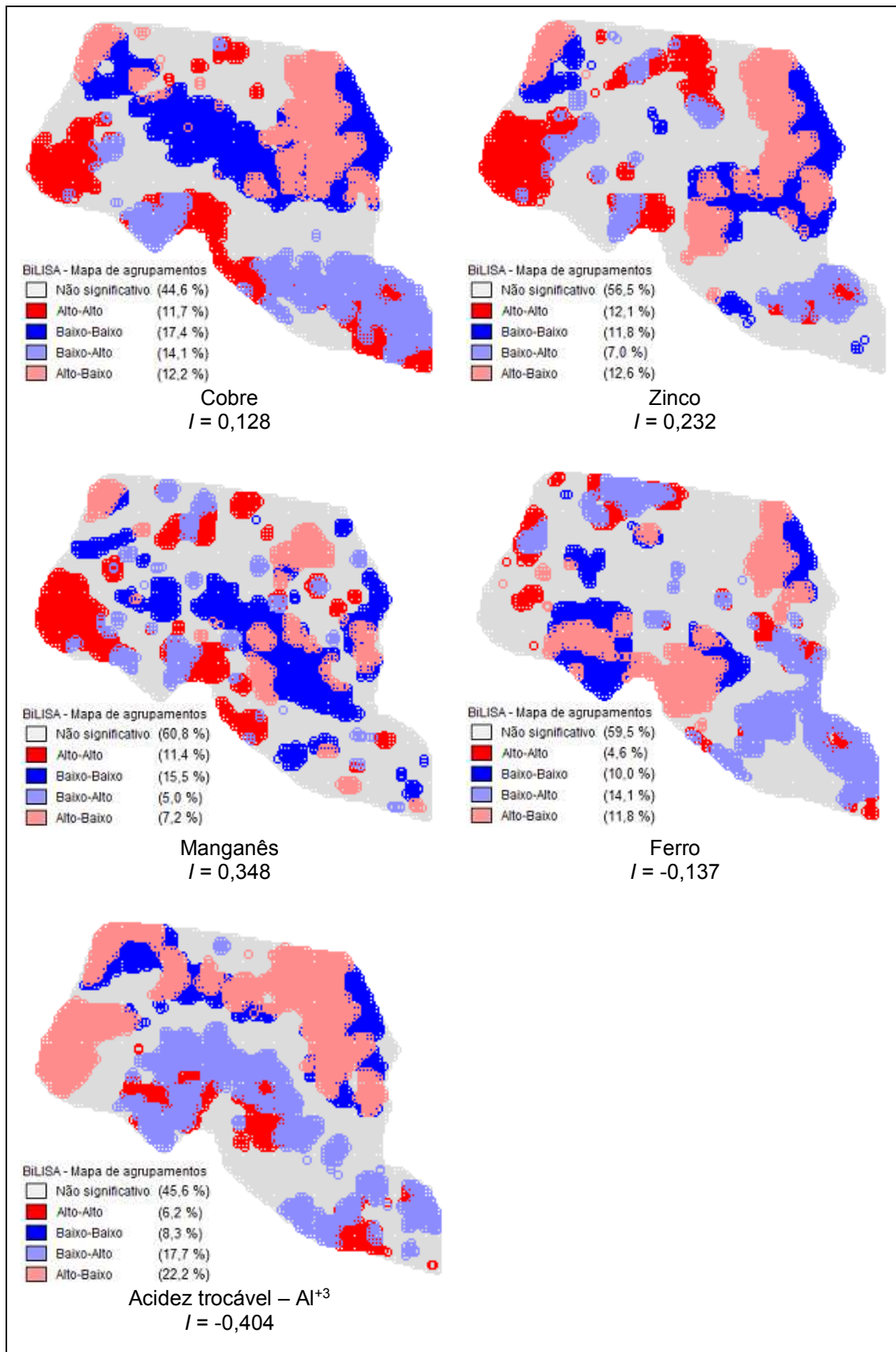


Figura 6. (Continuação) 2 - Mapas de clusters da correlação espacial entre CE_{a20} e os atributos do solo pelo Índice de Moran Global Bivariado.

Como já é conhecido, a quantidade de água e de sais presentes na solução do solo influencia diretamente na leitura da CE_a . Devido a essa influência, é de se esperar que exista correlação espacial local entre a CE_a e a umidade, teores de potássio, cálcio e magnésio. Por apresentarem correlação espacial positiva com a CE_a , em locais onde os níveis dos teores destes atributos são altos, os valores mensurados da CE_a também tendem a ser altos. Quando os níveis dos teores destes mesmos atributos são baixos, os valores mensurados da CE_a também tendem a ser baixos. O mesmo ocorre na associação espacial entre a CE_a e os micronutrientes manganês, cobre e zinco (Figura 6).

Como os agrupamentos do tipo alto-alto e baixo-baixo observados na correlação espacial local bivariada da CE_a com os atributos potássio, cálcio, magnésio, manganês, cobre e zinco ocorrem nas mesmas regiões da área estudada, isto significa que a uma mesma classe de manejo pode ser adotada para a aplicação à taxa variável, pois a distribuição espacial destes atributos mostrou-se compatível com o mapa da CE_a . Dessa forma, este resultado demonstra o potencial da CE_a como informação de entrada para a definição de classes de manejo (PERALTA et al., 2014; VALENTE et al., 2014).

Em se tratando de macro nutrientes, a baixa e negativa correlação espacial obtida entre a CE_a e o atributo fósforo pode ser explicada por dois fatores. O primeiro é a forma em que este atributo está disponível no solo, que normalmente são menos móveis que os cátions trocáveis. O segundo fator é a influência da forma de aplicação de fertilizantes fontes de fósforo e sistema de cultivo do solo adotado (PERALTA et al., 2014). Devido a essa pequena mobilidade, altos níveis de fósforo geralmente só são obtidos quando a amostragem do solo é realizada no mesmo local onde há deposição do fertilizante fosforado. Por isso, os agrupamentos do tipo alto-alto e baixo-baixo são menos comuns na associação local entre a CE_a e o fósforo. Essa baixa correlação espacial da CE_a com o fósforo não significa que a CE_a não possa ser utilizada para definir classes de manejo para o atributo fósforo, no entanto requer uma amostragem de solo mais criteriosa no que se refere a localização dos pontos a serem amostrados.

4.4. Análise de estabilidade temporal da CE_a

A análise de correlação entre dados obtidos com um intervalo de tempo entre as mensurações indica a persistência do padrão espacial das variáveis analisadas ao longo do tempo e, quanto mais próximo de um for essa correlação, maior será a estabilidade temporal do atributo avaliado (MORETI et al., 2007). O Diagrama de Dispersão de Moran Bivariado, quando composto pela mesma variável, mas mensuradas em datas diferentes, pode ser utilizado para a verificação da correlação espacial num determinado espaço de tempo (PEROBELLI et al., 2007). Dessa forma, a medida de correlação para determinação de estabilidade temporal neste estudo foi verificada pelo Índice de Moran Global Bivariado (Tabela 6).

Tabela 6: Índice de Moran Global Bivariado para correlação entre as determinações das CE_a's ao longo do tempo

	<i>I</i> ¹	2009	
		CE _a 20	CE _a 40
2015		0,224	0,402

¹Índice Global de Moran Bivariado; pseudo p-valor < 0.05 com 999 permutações.

A CE_a40 apresentou maior estabilidade temporal, uma vez que esta apresentou valor de correlação que se encontra mais próxima de um do que a CE_a20. Os valores da correlação entre as CE_a's determinadas em 2009 e 2015, encontram-se no intervalo dos resultados encontrados por McCutcheon et al. (2006), que em estudo relativo aos efeitos da água no solo sobre a condutividade elétrica aparente e sua relação com a textura, encontraram valores de correlação significativa variando de 0,10 a 0,76. Neste estudo os autores mediram condutividade elétrica aparente em um período de aproximadamente dois anos.

A estabilidade do padrão espacial da CE_a com o passar do tempo está relacionada a sua relação com atributos estáveis do solo como teor de areia, argila e capacidade de troca catiônica. Como em condições normais os teores desses atributos tendem a se manter, o padrão da CE_a também, o que confere a CE_a estabilidade suficiente para a delimitação de classes de manejo (TERRÓN et al., 2013).

4.5. Definição das classes de manejo

As classes de manejo definidas utilizando-se dados coletados em 2015 estão apresentadas nas Figuras 7 a 13. Os valores médios e desvios padrões de cada uma das classes de manejo definidas são apresentados nas Tabelas 7 a 13. Os índices para verificação do número ótimo de classes de manejo estão apresentados na Figura 14.

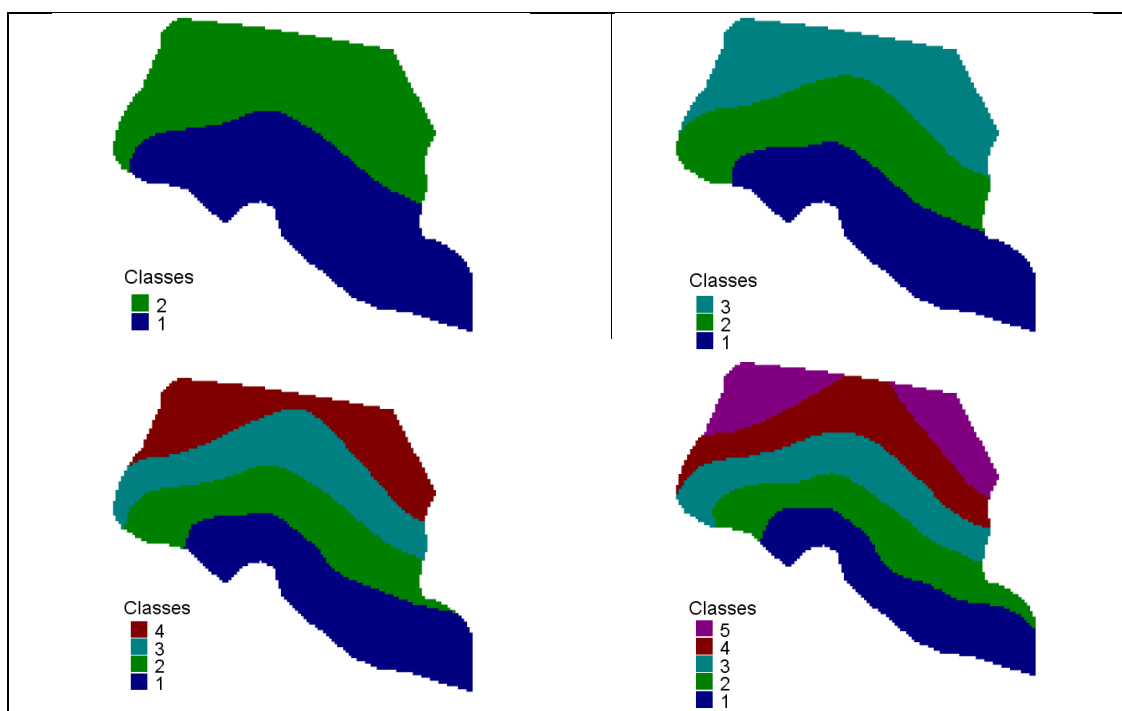


Figura 7. Classes de manejo definidas com base na altitude.

Tabela 7. Média e desvio padrão das classes de manejo definidas com base na altitude

Nº de classes de manejo	Classe	Altitude (m)	
		Média	Desvio Padrão
2	1	867,67	16,49
	2	929,47	18,03
3	1	858,93	10,45
	2	899,64	11,88
	3	940,13	12,18
4	1	855,66	8,33
	2	886,23	9,10
	3	917,20	8,89
	4	946,14	9,46
5	1	852,29	6,43
	2	874,21	7,14
	3	900,20	7,57
	4	926,65	7,29
	5	950,26	7,83

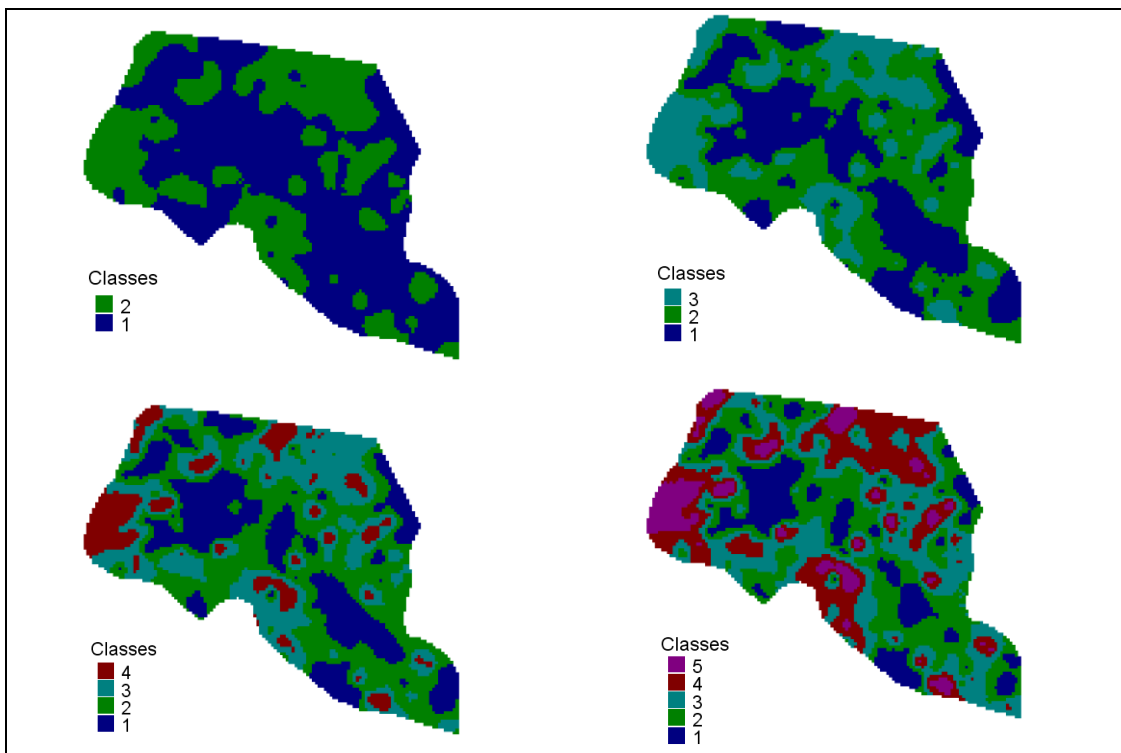


Figura 8. Classes de manejo definidas com base na CE_{a20}.

Tabela 8. Média e desvio padrão das classes de manejo definidas com base na CE_{a20}

Nº de classes de manejo	Classe	CE _{a20} (mS/m)	
		Média	Desvio Padrão
2	1	1,43	0,23
	2	2,13	0,28
3	1	1,27	0,17
	2	1,74	0,15
	3	2,31	0,25
4	1	1,21	0,15
	2	1,61	0,11
	3	2,02	0,13
	4	2,52	0,22
5	1	1,11	0,13
	2	1,44	0,09
	3	1,75	0,10
	4	2,12	0,11
	5	2,60	0,21

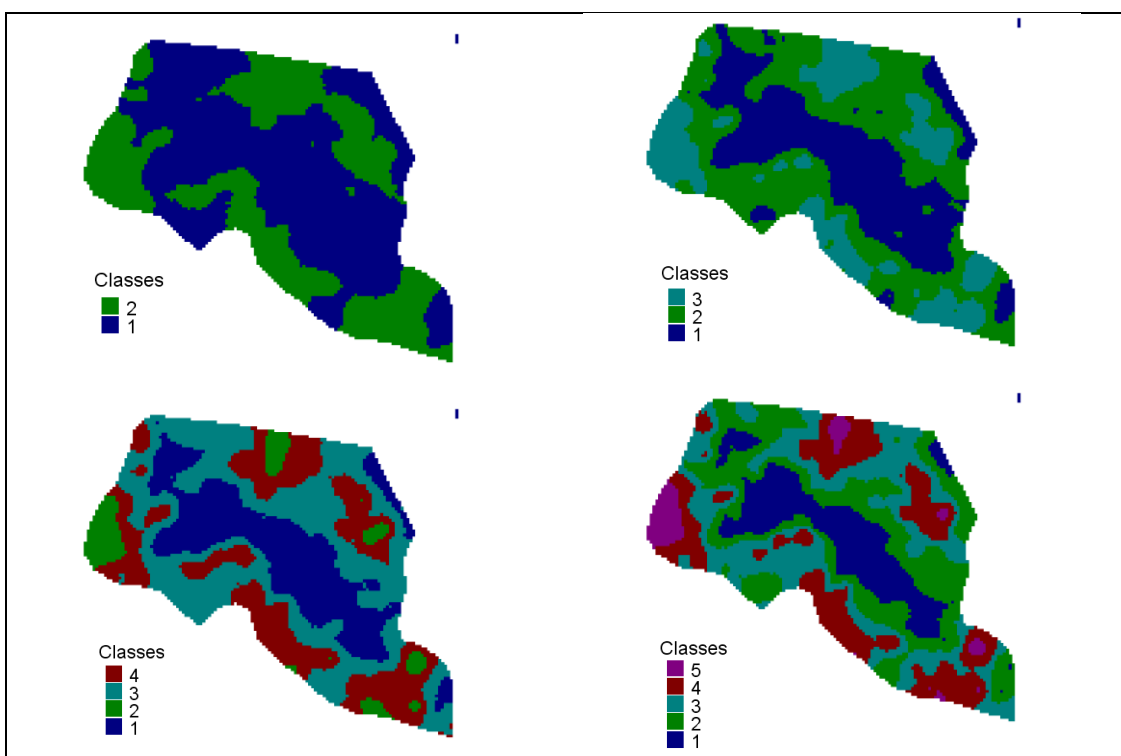


Figura 9. Classes de manejo definidas com base na CE_{a40}.

Tabela 9. Média e desvio padrão das classes de manejo definidas com base na CE_{a40}

Nº de classes de manejo	Classe	CE _{a40} (mS/m)	
		Média	Desvio Padrão
2	1	1,32	0,14
	2	1,73	0,17
3	1	1,17	0,13
	2	1,54	0,11
	3	2,00	0,25
4	1	1,12	0,11
	2	1,46	0,10
	3	1,81	0,11
	4	2,32	0,26
5	1	1,14	0,09
	2	1,37	0,06
	3	1,58	0,06
	4	1,80	0,07
	5	2,12	0,08

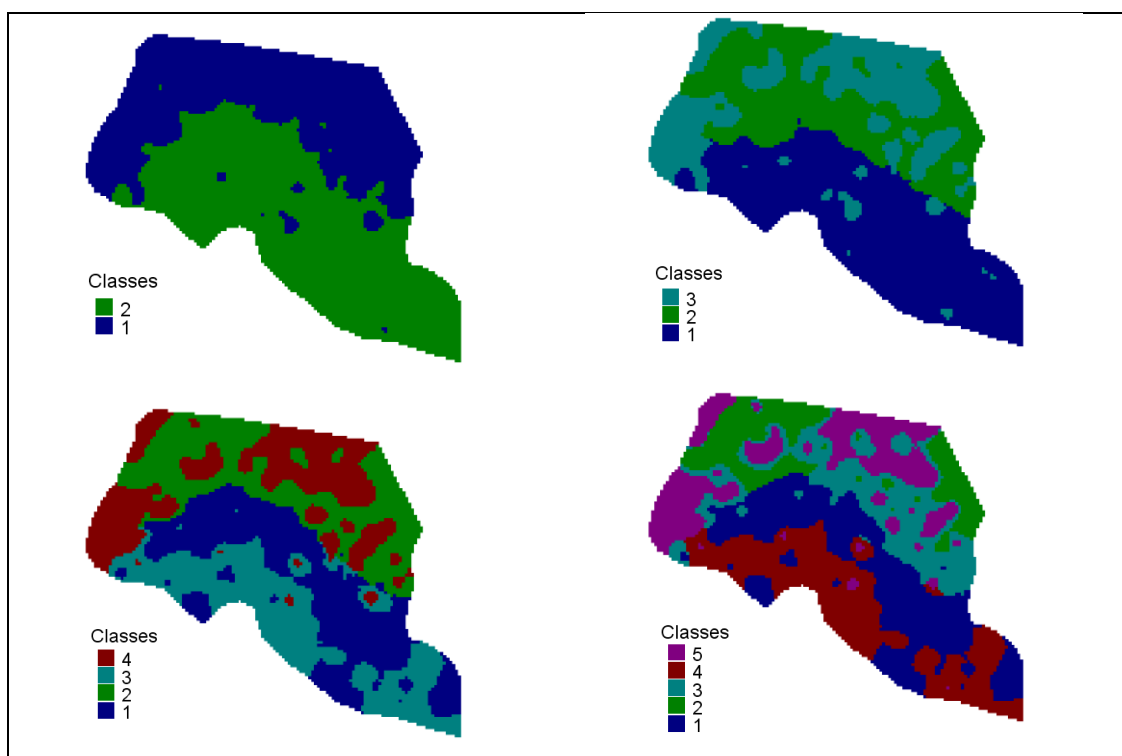


Figura 10. Classes de manejo definidas com base na CE_{a20} e altitude.

Tabela 10. Média e desvio padrão das classes de manejo definidas com base na CE_{a20} e altitude

Nº de classes de manejo	Classe	CE _{a20} (mS/m)		Altitude (m)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
2	1	1,55	0,34	871,18	20,02
	2	1,92	0,43	929,67	20,25
3	1	1,44	0,26	923,97	21,46
	2	1,60	0,32	864,12	14,40
	3	2,22	0,29	923,44	23,70
4	1	1,31	0,20	877,34	17,96
	2	1,53	0,23	933,78	17,43
	3	1,88	0,25	860,70	14,20
	4	2,24	0,28	926,78	18,71
5	1	1,30	0,19	875,16	17,19
	2	1,38	0,22	942,88	13,89
	3	1,77	0,15	916,42	15,77
	4	1,88	0,25	858,39	11,58
	5	2,32	0,25	927,80	20,24

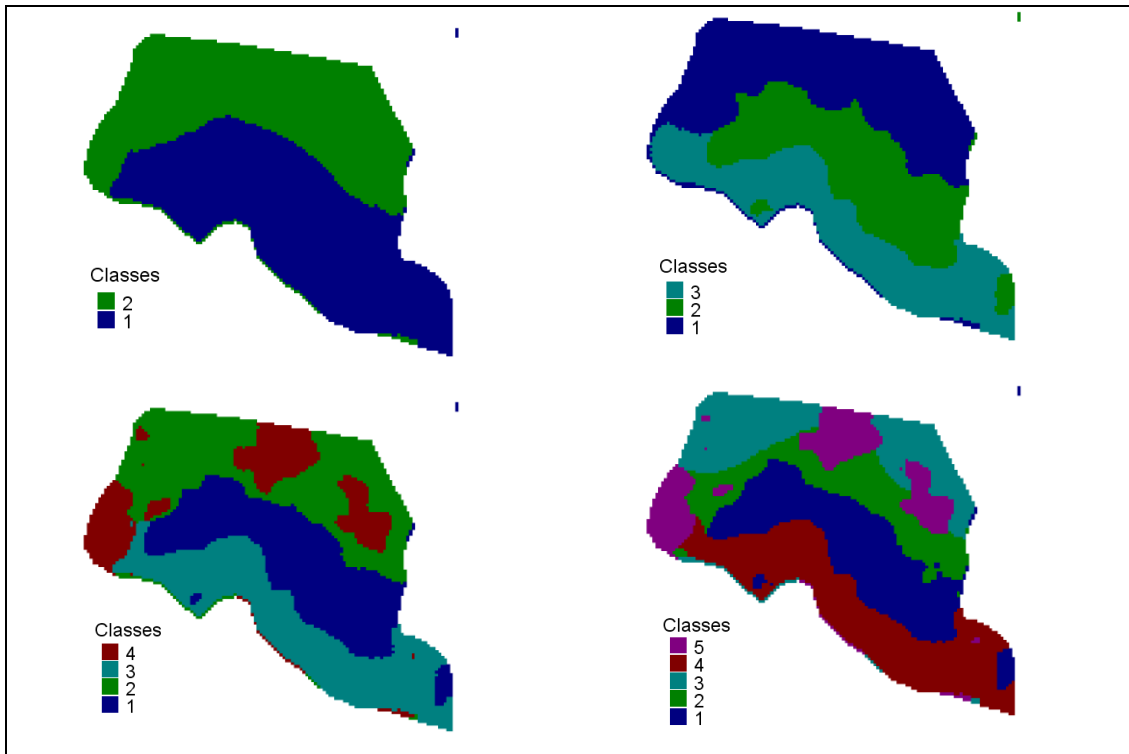


Figura 11. Classes de manejo definidas com base na CE_{a40} e altitude.

Tabela 11. Média e desvio padrão das classes de manejo definidas com base na CE_{a40} e altitude

Nº de classes de manejo	Classe	CE_{a40} (mS/m)		Altitude (m)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
2	1	1,50	0,26	866,82	15,95
	2	1,54	0,26	928,51	18,59
3	1	1,18	0,15	885,71	15,94
	2	1,61	0,29	934,53	15,71
	3	1,75	0,29	860,38	16,42
4	1	1,16	0,14	884,84	14,68
	2	1,45	0,15	935,81	17,09
	3	1,68	0,20	856,66	11,21
	4	2,02	0,30	923,13	16,00
5	1	1,14	0,14	882,29	14,06
	2	1,44	0,17	946,74	9,96
	3	1,47	0,14	912,31	10,06
	4	1,68	0,20	856,07	10,34
	5	2,06	0,29	923,32	15,85

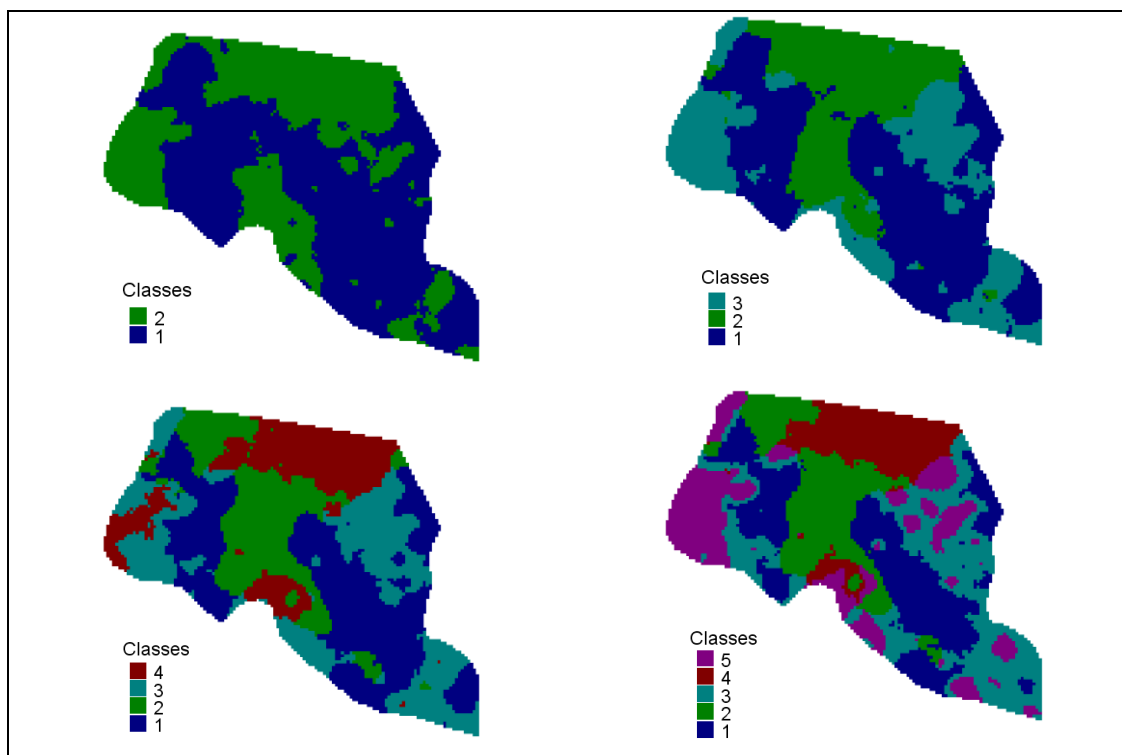


Figura 12. Classes de manejo definidas com base na CE_{a20} , umidade e teor de argila.

Tabela 12. Média e desvio padrão das classes de manejo definidas com base na CE_{a20} , umidade e teor de argila

Nº de classes de manejo	Classe	CE_{a20} (mS/m)		Umidade ($kg\ kg^{-1}$)		Teor de Argila ($kg\ kg^{-1}$)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
2	1	1,47	0,28	0,27	0,01	51,64	2,96
	2	2,05	0,36	0,29	0,01	53,69	3,82
3	1	1,41	0,27	0,27	0,01	51,36	2,39
	2	1,82	0,37	0,28	0,01	56,79	2,17
	3	2,07	0,35	0,29	0,01	50,16	2,08
4	1	1,39	0,25	0,27	0,01	50,76	1,81
	2	1,55	0,31	0,28	0,01	56,37	2,06
	3	1,96	0,31	0,28	0,01	49,94	1,90
	4	2,14	0,36	0,30	0,01	55,08	3,39
5	1	1,32	0,23	0,26	0,01	51,21	1,83
	2	1,55	0,31	0,27	0,01	56,67	1,91
	3	1,66	0,20	0,28	0,01	50,11	1,84
	4	2,02	0,32	0,29	0,01	56,63	2,34
	5	2,26	0,29	0,30	0,01	50,34	2,31

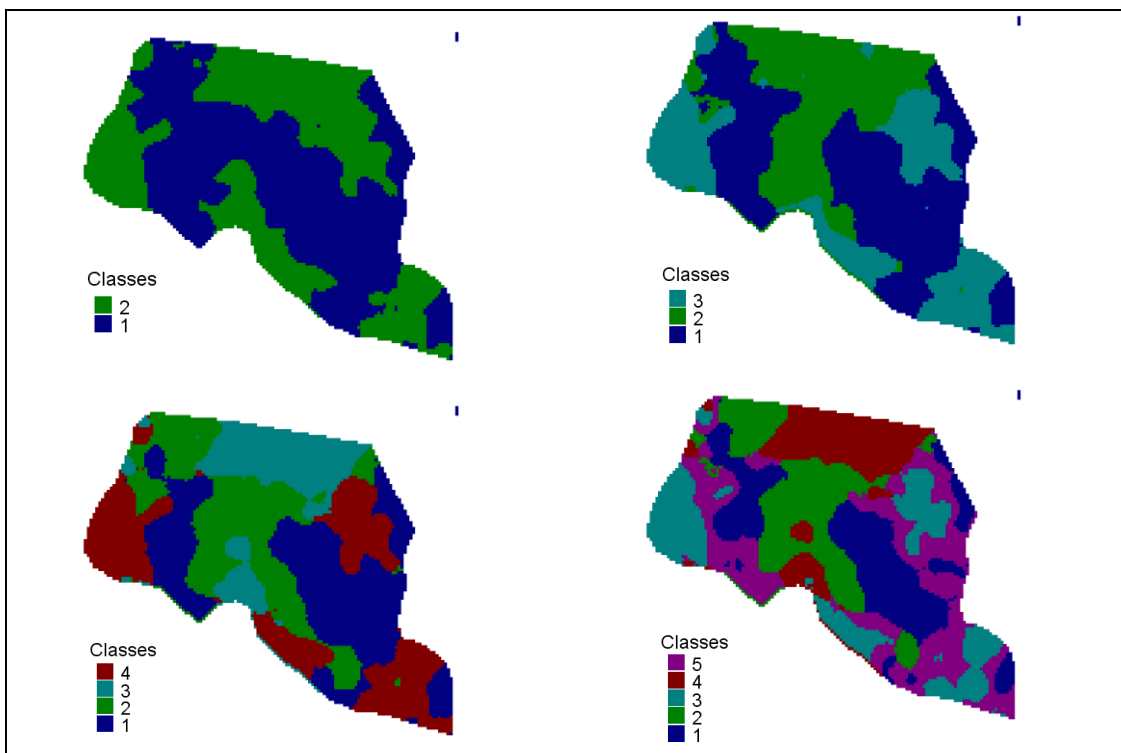


Figura 13. Classes de manejo definidas com base na CE_{a40}, umidade e teor de argila.

Tabela 13. Média e desvio padrão das classes de manejo definidas com base na CE_{a40}, umidade e teor de argila

Nº de classes de manejo	Classe	CE _{a40} (mS/m)		Umidade (kg kg ⁻¹)		Teor de Argila (kg kg ⁻¹)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
2	1	1,30	0,21	0,27	0,01	52,22	3,17
	2	1,79	0,29	0,29	0,01	52,86	3,85
3	1	1,27	0,20	0,27	0,01	51,36	2,39
	2	1,57	0,26	0,28	0,01	56,57	2,31
	3	1,86	0,30	0,29	0,01	49,93	1,85
4	1	1,27	0,19	0,26	0,01	50,23	1,68
	2	1,36	0,23	0,27	0,01	55,43	2,15
	3	1,70	0,23	0,28	0,01	56,43	2,51
	4	1,87	0,30	0,29	0,01	49,81	1,76
5	1	1,16	0,15	0,26	0,01	50,78	1,96
	2	1,37	0,23	0,27	0,01	56,31	1,91
	3	1,51	0,17	0,27	0,01	50,66	1,80
	4	1,71	0,23	0,29	0,01	56,48	2,49
	5	1,98	0,30	0,30	0,01	49,49	1,73

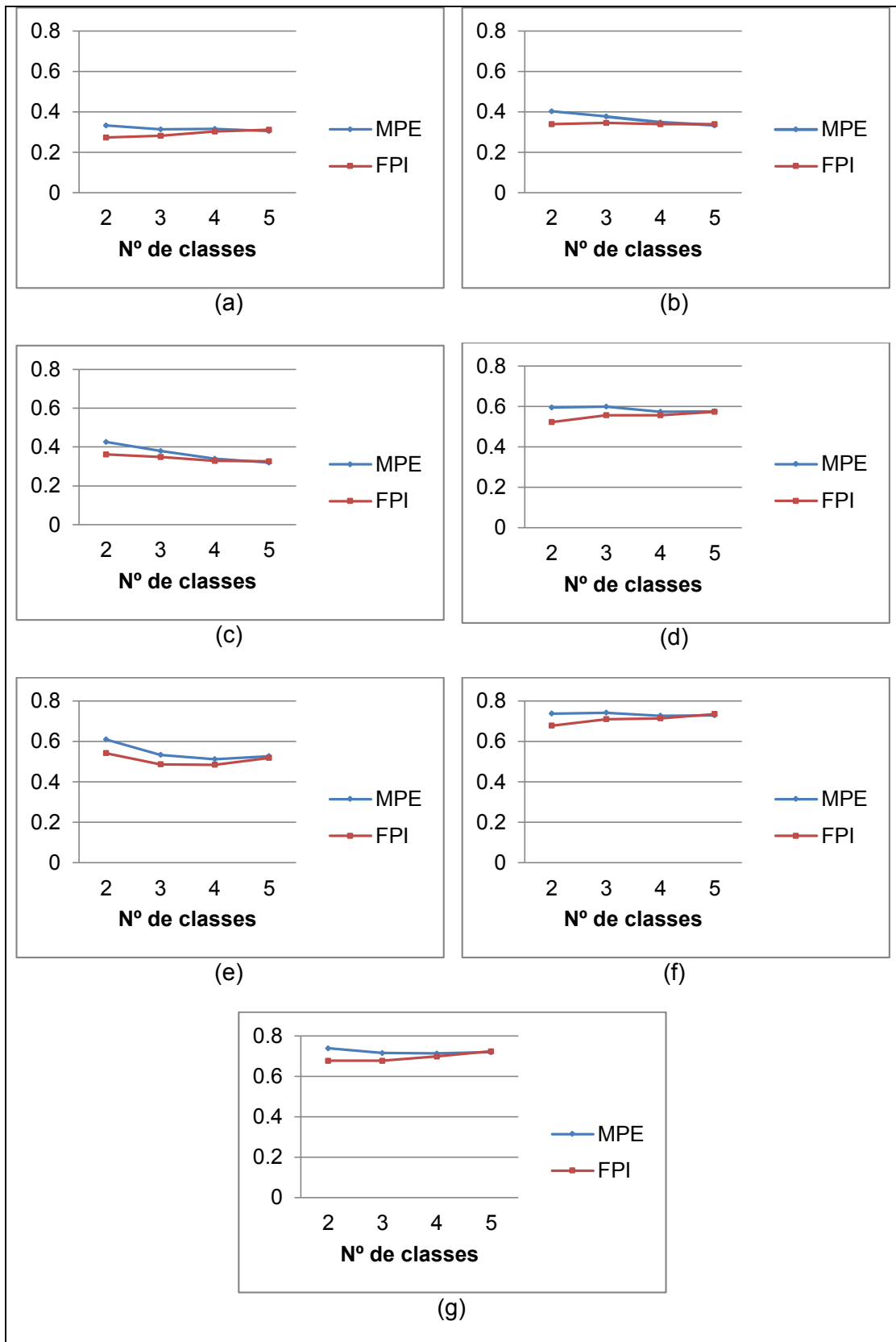


Figura 14. Índice de Performance Fuzzy (FPI) e Entropia da Partição Modificada (MPE) para as classes de manejo (a) CMA, (b) CM20, (c) CM40, (d) CM20A, (e) CM40A, (f) CM20UTarg, (g) CM40UTarg.

À medida que se aumentou o número de classes de manejo, aumentou-se também o grau de desorganização das delimitações dessas classes. Este fato se confirma ao se analisar os índices de performance fuzzy (FPI) e entropia da partição modificada (MPE) obtidos no momento da definição das classes de manejo (Figura 14). O número ótimo de classes de manejo é aquele em que o FPI e MPE sejam mínimos (SONG et al., 2009). No presente estudo a minimização concomitante de ambos em uma dada classe não ocorreu. Dessa forma, não foi possível indicar um número ótimo de classes de manejo seguindo a metodologia proposta.

Na maioria das classes de manejo definidas, a minimização do FPI e MPE ocorreu para um número distinto de classes (Figura 14). Por exemplo, nos casos das classes de manejo CM40UTarg, CM20UTarg, CM20A, CM20 e CMA, o mínimo valor do FPI foi para duas classes enquanto o mínimo valor do MPE ocorreu para cinco classes. No que concerne aos índices supracitados, os resultados obtidos neste trabalho foram semelhantes aos obtidos por Alves et al. (2013), onde não foi observado um valor mínimo dos índices para um mesmo número de classes. Sendo assim, em casos como este, onde os índices não convergem para o mesmo número de classes, seria necessária maior investigação a respeito das médias das classes para verificar se estas possuem diferença significativa entre si. Quando se define classes de manejo, deve-se ter cuidado quanto ao número máximo de classes, pois um grande número de classes poderia acarretar em uma gestão inviável da mesma, visto que classes de manejo com áreas muito pequenas tornam-se impossíveis de serem manejadas devido a limitações técnicas e econômicas (TISSEYRE; MCBRATNEY, 2008).

No que diz respeito ao número ideal de classes, várias pesquisas divergem entre si, dado que as informações usadas para a definição das classes, bem como a área onde são estabelecidas variam. Essa divergência quanto ao número ótimo de classes é verificada ao analisar os resultados de trabalhos desenvolvidos (DE CARIÉS et al. (2015); PERALTA et al. (2015); BRITO (2014); YAO et al. (2014); REIS et al. (2013); MORAL et al.(2010)), que definindo classes de manejo com base em condutividade elétrica aparente e também outras características do solo e culturas, obtiveram dois como sendo o número ótimo de classes para as classes de manejo. Por

outro lado, Valente (2010); Song et al. (2009); Li et al. (2008) e Li et al. (2007), observaram, que o número ideal de classes seria três. Como neste trabalho não foi possível definir o número ótimo de classes pelo FPI e MPE, a solução para esse problema pode estar numa análise complementar a cerca da estabilidade temporal do padrão espacial das classes de manejo definidas entre 2009 e 2015, apresentada no próximo tópico.

4.6. Comparação das classes de manejo ao longo do tempo

Na Tabela 14 estão apresentados os índices de concordância *Kappa* referente à comparação entre os mapas das classes de manejo definidas no intervalo de julho de 2009 a fevereiro de 2015. À medida que se aumentou o número de classes das classes de manejo, com o passar do tempo, diminuiu-se a concordância entre os mapas. Essa tendência é explícita para todas as classes de manejo definidas neste estudo. Outra tendência que se pode verificar é que quando foram utilizadas apenas as condutividades elétricas aparente como informações de entrada para definição das classes de manejo, a concordância entre os mapas foi baixa, principalmente para as classes definidas com base na CE_{a20}. Provavelmente devido a sua maior susceptibilidade a variação espaço-temporal por ser mais superficial (HARTSOCK et al., 2000).

Tabela 14. Concordância entre as classes de manejo definidas no ano de 2009 e 2015

Classes de Manejo	2 classes	3 classes	4 classes	5 classes
CMA	0,99*	0,98*	0,97*	0,97*
CM20	0,16*	0,11*	0,07*	0,07*
CM40	0,20*	0,20*	0,12*	0,13*
CM20A	0,73*	0,39*	0,41*	0,38*
CM40A	0,81*	0,48*	0,48*	0,44*
CM20UTarg	0,24*	0,28*	0,22*	0,27*
CM40UTarg	0,09*	0,32*	0,30*	0,26*

*Significativo ao nível de 5 %, pelo teste Z.

A partir do momento que se inseriu informação de estabilidade temporal conhecida para definir as classes de manejo, como a altitude, por exemplo, a concordância tendeu a ser maior, quando se compara com as classes definidas com atributos mais variáveis no espaço e no tempo, como a CE_a20 e CE_a40 (Tabela 14). Dessa forma, esta verificação corrobora com os resultados observados por Valente (2010) e Kitchen et al. (2005), que sugerem que na definição de classes de manejo devem ser utilizadas mais de uma variável, e entre estas a altitude é uma boa opção, para a região e cultura estudadas, tendo em vista que a altitude é, ainda, um fator que influencia a qualidade do café (SILVA et al., 2008).

Dentre as concordâncias obtidas neste trabalho, todas foram significativas ao nível de 5 % pelo teste Z. Entre as classes de manejo geradas, as melhores concordâncias ocorreram para a CM20A e CM40A, com Kappa de 0,73 e 0,81, respectivamente, quando ambas foram definidas com duas classes. Segundo classificação proposta por Landis e Koch (1977), a concordância entre as CM20A foi “muito boa”, enquanto a concordância entre as CM40A foi considerada “excelente”. Isso demonstra que um zoneamento com duas classes para a área de estudo também seria uma boa escolha em termos de estabilidade espacial e temporal, pois esse resultado indica que essas classes foram as que sofreram menor variação durante o intervalo de tempo analisado, ou seja, este resultado indica que dois é o número ótimo de classes.

Na classificação das maiores concordâncias, na sequência têm-se os *Kappas* obtidos na comparação entre as CM20A e CM40A definidas com três classes, com concordâncias de 0,39 e 0,48; respectivamente. De acordo com a classificação proposta por Landis e Koch (1977), a CM20A apresentou uma concordância considerada “razoável”, enquanto a comparação entre as CM40A de 2009 e 2015 resultou em uma concordância “boa”. Este resultado reforça a hipótese de que a definição de classe de manejo com três classes, para esta área, continua válida, conforme verificado por Valente (2010).

4.7. Concordância das classes de manejo geradas com os atributos do solo

A Tabela 15 traz os índices de concordância *Kappa* obtidos na comparação entre as classes de manejo e algumas variáveis do solo. De acordo com a classificação proposta por Landis e Koch (1977), a maioria das concordâncias obtidas neste estudo foram consideradas “razoáveis”. Ao analisar essa tabela pode-se verificar que, de maneira geral, a classificação dos índices de concordâncias obtidos variou entre ruim e boa, assim como o resultado obtido por Alves et al. (2013) e Valente (2010). Pode-se verificar também que as concordâncias entre as CM20UTarg e CM40UTarg com os mapas dos atributos foram classificadas como ruins, divergindo assim dos resultados obtidos por Brito (2014), que em estudo sobre a definição de classes de manejo aplicadas à silvicultura, utilizando a CE_a, umidade e teor de argila como variáveis de entrada na definição das classes, obteve concordâncias classificadas de boa a muito boa para quase todos os atributos, exceto para a comparação destas com o mapa de fósforo que foi considerada ruim.

Tabela 15. Índices *Kappa* de concordância entre as classes de manejo geradas com três classes e os mapas dos atributos

Atributos do solo	Classes de manejo						
	CMA	CM20	CM40	CM20A	CM40A	CM20UTarg	CM40UTarg
K	0,13 ^A	0,23 ^B	0,25 ^B	0,14 ^A	0,11 ^C	0,16 ^A	0,17 ^A
P	0,07 ^A	0,07 ^A	0,12 ^B	0,06 ^A	0,08 ^A	0,12 ^B	0,16 ^B
P-rem	0,34 ^A	0,23 ^B	0,28 ^B	0,25 ^B	0,39 ^C	0,11 ^D	0,18 ^E
MO	0,35 ^A	0,04 ^B	0,18 ^C	0,24 ^D	0,36 ^A	0,16 ^C	0,22 ^D
H + Al	0,40 ^A	0,20 ^B	0,11 ^C	0,33 ^D	0,31 ^D	0,13 ^C	0,15 ^C
pH	0,51 ^A	0,18 ^B	0,07 ^C	0,60 ^D	0,34 ^E	0,25 ^F	0,17 ^B
Ca²⁺	0,40 ^A	0,18 ^B	0,25 ^C	0,48 ^D	0,30 ^E	0,24 ^C	0,20 ^B
Cu	0,27 ^A	0,06 ^B	0,19 ^C	0,33 ^D	0,34 ^D	0,15 ^C	0,27 ^A
Zn	0,16 ^A	0,13 ^B	0,12 ^B	0,16 ^A	0,17 ^A	0,12 ^B	0,10 ^C

*Valores de *Kappa* com letras diferentes na mesma linha diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Z.

Percebe-se ainda que as maiores concordâncias com os mapas dos atributos foram obtidas nas comparações com a CMA, CM20A e CM40A. Já os piores índices *Kappas* foram obtidos nas comparações entre todas as classes de manejo geradas e o atributo fósforo, o que proporcionou uma concordância classificada como ruim para a comparação entre esses mapas.

Este resultado pode ser justificado pela baixa e negativa correlação espacial entre a CE_a e o fósforo determinada no item 4.3 deste trabalho.

Fazendo uma análise isolada por atributo, pode-se verificar que dentre todas as comparações efetuadas, a maior concordância foi para a comparação entre os mapas da CM20A e do atributo pH. Concordância esta que se classifica como boa, segundo Landis e Koch (1977). Já o pior *Kappa* também envolve a CM20A, só que desta vez em comparação com a variável fósforo. Para o atributo acidez potencial (H+Al), a maior concordância foi com a CMA. Para o potássio a maior concordância foi com a CM20 e CM40, que para este atributo foram iguais estatisticamente. Para o pH a maior concordância foi com o mapa da CM20A.

Comparando os presentes resultados com os obtidos por Valente (2010), percebe-se que a concordância dos mapas da CM20A e CM40A com o mapa do atributo potássio, que foram consideradas boas pelo autor, passaram a apresentar uma concordância ruim neste estudo. Para as comparações dessas mesmas classes de manejo com o mapa do fósforo remanescente, as concordâncias que eram classificadas como boas pelo mesmo autor passaram a ser razoáveis no presente trabalho.

Em resumo, a CMA apresentou concordância razoável para cinco atributos e boa para um. Já a CM40A apresentou concordâncias classificadas como razoáveis para seis atributos, enquanto a CM20A apresentou concordâncias razoáveis para quatro e boas para dois atributos. Em termos de classificação das concordâncias com os mapas dos atributos, a melhor classe de manejo definida foi a CM20A, o que também foi verificado por Valente (2010). Mas quando essa comparação é feita utilizando o valor dessas concordâncias, há um empate entre a CM20A e CM40A, pois estas apresentaram concordâncias estatisticamente iguais para 4 atributos e uma foi maior que a outra para dois atributos. Essa análise indica que a CM40A também é uma boa opção para a definição de classes de manejo. Dessa forma, conforme constatado por Valente (2010), as classes CM20A e CM40A se mostraram uma boa escolha para o manejo diferenciado do solo, visto as concordâncias com os mapas dos atributos que estas proporcionaram.

5. CONCLUSÕES

Os mapas de condutividade elétrica aparente do solo de 0 a 0,20 e 0 a 0,40 m de profundidade obtidos em 2015 apresentaram menor continuidade espacial quando comparados aos mapas das mesmas obtidos em 2009.

A condutividade elétrica aparente do solo mensurada nas profundidades de 0 a 0,20 e 0 a 0,40 m apresentaram correlação significativa com a maioria dos atributos, sendo estas correlações maiores com os atributos fósforo remanescente, umidade, potássio, cálcio e magnésio. O padrão de correlação entre a CE_a os atributos no intervalo de cinco anos se manteve.

Em termos de variação no tempo, a CE_{a20} apresentou maior amplitude na variação dos seus valores do que a CE_{a40} , o que indicou a maior estabilidade temporal da CE_{a40} . Para delimitação de classes de manejo a serem utilizadas por intervalo de tempo superior a quatro anos, os resultados deste trabalho indicam que a utilização da CE_{a40} como informação de entrada para a definição das classes de manejo é uma boa alternativa.

Para avaliação da estabilidade do padrão espacial da condutividade elétrica aparente do solo a mensuração desta deverá ser realizada com o solo úmido e esta condição de umidade deverá ser a mesma em todos os momentos de mensuração.

Quanto à variação nas localizações das classes de manejo, para o período avaliado de aproximadamente cinco anos, as classes de manejo mais estáveis no espaço e no tempo foram as classes de manejo definidas com base na condutividade elétrica aparente mensurada na camada de 0 a 0,20 m de profundidade mais a altitude e a classes de manejo definidas com base na condutividade elétrica aparente mensurada na camada de 0 a 0,40 m de profundidade mais a altitude, mantendo ainda concordância classificada como pelo menos razoável com os mapas dos atributos do solo, confirmando assim a indicação destas como boas opções de delimitações de classes de manejo em cafeicultura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JR., P. C.; CORREA, P. C.; GONELI, A. L. D.; SILVA, F. S. Contribuição das Etapas do Pré-Processamento para a Qualidade do Café, **Revista Brasileira de Armazenagem**, Viçosa-Especial Café, MG, n. 8, p. 46-53. 2004.
- AGGELOPOULOU, K.; GEMTOS, T. Delineation of management zones in an apple orchard: correlations between yield and soil properties. **Proceedings of the 5th International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainable Agri-production and Environment (HAICTA 2011)** Skiathos, Greece, September 8-11, 2011.
- ALMEIDA, E. **Econometria espacial aplicada**. Campinas, SP: Editora Alínea, 2012. 485p.
- ALVES, S. M. F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M. Definição de Classes de Manejo a Partir de Mapas de Condutividade Elétrica e Matéria Orgânica, **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 1, p. 104-114, jan./fev. 2013.
- AMARAL, J. F. T.; MARTINEZ, H. E. P.; LAVIOLA, B. G.; TOMAZ, M. A.; FILHO, E. I. F.; CRUZ, C. D. Produtividade e eficiência de uso de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 65-74, jan./abr. 2011.
- ANSELIN, LUC; SYABRI, IBNU; KHO, YOUNGIHN. GeoDa: An introduction to spatial data analysis. **Geographical Analysis**, Columbus, v. 38, n. 1, p. 5-22, jan. 2005.
- ARAÚJO, E. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Modelo de regressão espacial para estimativa da produtividade da soja associada a variáveis agrometeorológicas na região oeste do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 286-299, mar./abr. 2014.
- BARNETT, V.; LEWIS, T. **Outliers in Statistical Data**, 3rd edn. John Wiley & Sons, 1994. 608p.
- BRITO, M. D. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta à silvicultura de precisão**. 2014. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014.
- CONAB (2014). **Armazenagem**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 18 ago. 2014.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, New York, v. 37, n. 1, p. 35-46, jul. 1991.
- CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A review of three discrete multivariate analysis techniques used in assessing the accuracy of remotely sensed data from error matrices. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Caceres, v. 24, n. 1, p. 169-174, jan. 1986.
- CORWIN, D. L.; HENDRICKX, J. M. H. Electrical Resistivity: Wenner Array. In: SILVA, J.S. **Methods of Soil Analysis Part 4 Physical Methods**, Madison, Wisconsin, USA: SSSA Book Series, 2002. v. 5, p. 1282-1287.

CORWIN, D. L.; LESH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agricultural. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v. 46, p. 11-43, mar. 2005.

CORWIN, D. L.; S. M. LESCH. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 3, p. 471-471. mai./jun. 2003.

CORWIN, D.L., LESCH, S.M., SHOUSE, P.J., SOPPE, R., AYARS, J. E. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003b.

COSTA, M. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; REIS, E. F.; SANTOS, N. T. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 4, p. 395-401, out./dez. 2014.

DE CAIRES, S. A.; WUDDIVIRA, M. N.; BEKELE, I. Spatial analysis for management zone delineation in a humid tropic cocoa plantation. **Precision Agriculture**, New York, v. 16, n. 2, p. 129-147, abr. 2015.

DIAS, D. F.; ALVES, A. F. Um estudo sobre a localização industrial do estado de São Paulo, **A Economia em Revista - AERE**, Maringá, v. 19, n. 1, p. 19-29, jul. 2011.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997. 212p.

FAULIN, G. D. C.; MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. Variabilidade espacial da umidade e sua influência na condutividade elétrica do solo. **Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Canoas, RS, 2005.

FLEMING, K. L.; HEERMANN, D. F., WESTFALL, D. G. Evaluating Soil Color With Farmer Input and Apparent Soil Electrical Conductivity for Management Zone Delineation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 6, p. 1581-1587, nov. 2004.

FRIDGEN, J.J., KITCHEN, N. R., SUDDUTH, K.A., DRUMMOND, S. T., WIEBOLD, W. J., FRAISSE, C.W. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 100-108, jan. 2004.

FU, Q. ; WANG, Z.; JIANG, Q. Delineating soil nutrient management zones based on fuzzy clustering optimized by PSO. **Mathematical and Computer Modelling**, [S.l.], v. 51, n. 11, p. 1299-1305, jun. 2010.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+ for Windows. Version 9.0. Michigan: Gamma Design Software, 2008.

HARTSOCK, N. J.; MUELLER, T. G.; THOMAS, G. W.; BARNHISEL, R. I.; WELLS, K. L.; SHEARER, S. A. Soil electrical conductivity variability. In: International conference on precision agriculture, 5. 2000. **Proceedings...** CD-ROM. P. C. Robert et al., eds. Madison, Wisc.: ASA-CSSASSSA, 2000.

HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U. Characterization of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site.

Computer & Geosciences, [S.I.], v. 39, p. 98-110, fev. 2012.

HODGE, V. J.; AUSTIN, J. A Survey of Outlier Detection Methodologies. **Artificial Intelligence Review**, Dordrecht, v. 22, n. 2, p. 85-126, out. 2004.

HUDSON, W.D.; RAMM, C.W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric engineering & remote sensing**, Bethesda, v. 53, n. 4, p. 421-422, abr. 1987.

KACHANOSKI, R. G.; DE JONG, E. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. **Water Resources Research**, Malden, v. 24, n. 1, p. 85-91, jan. 1988.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computer and Electronics in Agriculture**, [S.I.], v. 46, n. 1, p. 285-308, mar. 2005.

KWEON, G. Delineation of site-specific productivity zones using soil properties and topographic attributes with a fuzzy logic system **Biosystems Engineering**, [S.I.], v. 112, n. 4, p. 261-277, ago. 2012.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**. Washington, v. 33, n. 1, p. 159-174. 1977. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2529310>>. Acesso em: 11 nov. 2014.

LI, Y.; SHI, Z.; LI, F. Delineation of Site-Specific Management Zones Based on Temporal and Spatial Variability of Soil Electrical Conductivity. **Soil Science Society of China, Pedosphere**, [S.I.], v. 17, n. 2, p. 156-164, abr. 2007a.

LI, Y.; SHI, Z.; WU, C.; LI, F.; LI, H. Optimised Spatial Sampling Scheme for Soil Electrical Conductivity Based on Variance Quad-Tree (VQT) Method. **Agricultural Sciences in China**, [S.I.] v.6, n.12, p.1463-1471. dez. 2007b.

LI, Y.; SHI, Z.; WU, C.; LI, H.; LI, F. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. **Journal of Zhejiang University**, Zhejiang, v. 9, n. 1, p. 68-76, jan. 2008.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, M. S.; CURI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 517-526, mai. 2014.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, B. E. M.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1023-1031, jun. 2006.

MATIELLO, J. B.; GUIMARÃES, R. J.; ALMEIDA, S. R.; JAPIASSÚ, L. B.; PAIVA, R. N.; GARCIA, A. W. R.; CARVALHO, C. H. S. Recomendando a poda em cafezais. **Revista de tecnologia cafeeira**, Varginha, v. 4, n. 11, p. 3-39, jan./abr. 2007.

MCCUTCHEON, M. C.; FARAHANI, H. J.; STEDNICK, J. D.; BUCHLEITER,

G. W.; GREEN, T. R. Effect of Soil Water on Apparent Soil Electrical Conductivity and Texture Relationships in a Dryland Field. **Biosystems Engineering**, [S.l.], v. 94, n. 1, p. 19-32, mai. 2006.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, [S.l.], v. 15, n. 12, p. 1417-1422, dez. 1984.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. **FuCMe Version 3**. Australian centre for precision agriculture. The University of Sydney, NSW, 2006. Disponível em: <<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>>. Acesso em: 23 set. 2014.

MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, n. 1, p. 1-5. jan./fev. 2013.

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 420-426, mai./ago.2005.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil & Tillage Research**, [S.l.], v. 106, p. 335-343, jan. 2010.

MORETI, D.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; LOVATTI, M. J.; AGUIAR, L. I. G. Avaliação espaço-temporal das armazenagens gravimétricas e volumétricas da água num Latossolo com citros. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1281-1290, dez. 2007.

NASCIMENTO, E. F.; BASSOI, L. H.; RABELLO, L. M. Definição da malha de amostragem da condutividade elétrica do solo para obtenção de classes de manejo em pomar de videira. In: Embrapa Instrumentação. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**, Brasília, 2012, p. 413 – 420.

NOGUEIRA, N. O.; TOMAZ, M. A.; ANDRADE, F. V.; REIS, E. F.; BRINATE, S. V. B. Influência da aplicação de dois resíduos industriais nas propriedades químicas de dois solos cultivados com café arábica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 1, p. 11-21, jan./mar. 2012.

OLIVEIRA, I. P.; OLIVEIRA, L. C.; MOURA, C. S. F. T. Cultivo de café: pragas, doenças, correção do solo, adubação e consórcio. **Revista Faculdade Montes Belos**, São Luiz de Montes Belos, v. 5, n. 4, p. 56-77, abr. 2012.

ORTEGA, R. A.; SANTIBÁÑEZ, O. A. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v. 58, p. 49-59, ago. 2007.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v. 99, p. 218–226, nov. 2013.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; FRANCO, M. C.; CÓRDOBA, M.; BULLOCK, D. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. **Computers and Electronics in**

Agriculture, [S.l.], v. 110 p. 103-113, jan. 2015.

PEROBELLI, F. S.; ALMEIDA, E. S.; ALVIM, M. I. S. A.; FERREIRA, P. G. C. Produtividade do setor agrícola brasileiro (1991-2003). **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 17, n. 1, p. 65-91, jan./abr. 2007.

QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; ZANDONADI, R. S.; EMERICH, I. N.; SENA JUNIOR, D. G. Uso de técnicas de agricultura de precisão para a cafeicultura de montanha. In: ZAMBOLIM L. (Ed.) **Efeitos da irrigação sobre a qualidade e produtividade do café**. Viçosa, MG. p. 77-108, 2004.

REIS, J. S.; ALVES, S. M. F.; JUNIOR, J. A.; PESSOA, A. A.; SILVA, R. R. Determinação de classes de manejo para adubação nitrogenada em lavoura de tomate industrial. **Revista Agrotecnologia**, Anápolis, v. 4, n. 2, p. 68 - 84, 2013.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., H.V., eds. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.

RODRIGUES JR., F. A. **Geração de classes de manejo para cafeicultura com base em determinações usando sensor SPAD e análise foliar**. 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

RUIZ, H. A. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 30, 2005, Recife, PE. **Anais...** Recife: UFRPE, SBCS, 2005a. CD ROM.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 297-300, abr. 2005b.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; DA SILVA, R. F.; DAROS, C. O. Definição de classes de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão, **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

SERRANO, J. M.; PEÇA, J. O.; SILVA, J. R. M.; SHAHIDIAN, S. Spatial and temporal stability of soil phosphate concentration and pasture dry matter yield. **Precision Agriculture**, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 214-232, abr. 2011.

SERRANO, J. M.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. R. M. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. **Precision Agriculture**, [S.l.], v. 14, p. 99–114, fev. 2013.

SILVA JR., J. F.; SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 415–424, 2012.

SILVA, A. A.; LANA, R. M. Q.; LANA, A. M. Q.; BOMTEMPO, L. F.; COUTO JR., P. A. Mapas de fertilidade de solo em área manejada com agricultura de precisão cultivada com café, **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v. 5, n. 1, p. 194-204, jan./jun. 2014.

SILVA, V. A.; PEREIRA, R. G. F. A.; BORÉM, F. M.; FERREIRA, D. F. Qualidade do café produzido em diferentes altitudes do sul de Minas Gerais e processado por via seca. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, v. 1, n. 2, p. 219-229, mai./ago. 2008.

SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 471-487, 2009.

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261-268, fev. 2014.

SPECTRUM TECHNOLOGIES INC. TDR Soil Moisture: Product Manual. 2015.

TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing Management Classes for Broadacre Agricultural Production. **American Society Agronomy**, Madison, v. 99, p. 1366-1376, set. 2007.

TERRÓN, J. M.; MORAL, F. J.; MARQUES DA SILVA, J. R.; REBOLLO, F. J. Analysis of spatial pattern and temporal stability of soil apparent electrical conductivity and relationship with yield in a soil of high clay content. In: **3rd Global Workshop Proximal Soil Sensing**, Postdam, Germany, 2013. p. 302-306.

TISSEYRE, B.; MCBRATNEY, A. B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture. **Precision Agriculture**, [S.l.], v. 9, n. 1-2, p. 101-113, abr. 2008.

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir classes de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 103f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, F. L.; SANTOS, N. T. Spatial variability of apparent electrical conductivity and soil properties in a coffee production Field. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1224-1233, nov./dez. 2014.

VALENTE, D.S.M; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SANTOS, N.T.; SANTOS, F.L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 69, p. 173-179, mai./jun. 2012.

VIEIRA, V. A. S.; MELLO, C. R.; LIMA, J. M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1477-1485, set./out. 2007.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. **Precision Agricultural**, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 265-279, nov. 2000.

XU, H. W., WANG, K., BAILEY, J., JORDAN, C.; WITHERS, A. Temporal stability of sward dry matter and nitrogen yield patterns in a temperate grassland. **Pedosphere**, [S.l.], v. 16, n. 6, p. 735-744, dez. 2006.

YAO, R. J.; YANG, J. S.; ZHANG, T. J.; GAO, P.; WANG, X. P.; HONG, L.

Z.; WANG, M. W. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. **Geoderma**, [S.l.], v. 232–234, p. 381–393, nov. 2014.

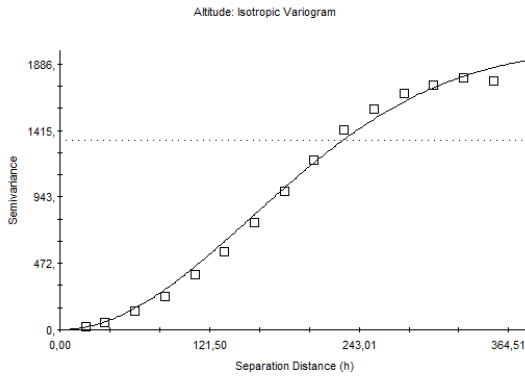
ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture - a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v. 36, p. 113-132, nov. 2002.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

7. APÊNDICES

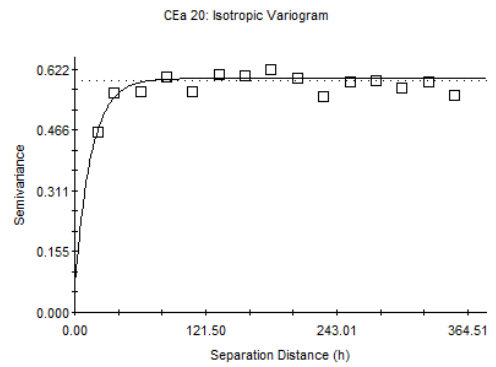
Apêndice A

Semivariogramas dos atributos do solo em 2015



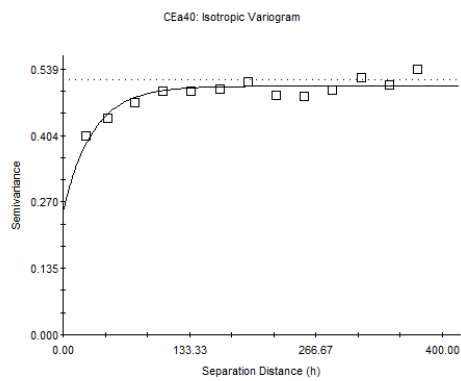
Gaussian model ($C_0 = 1,00000$; $C_0 + C = 2012,00000$; $A_0 = 219,00$; $r^2 = 0,995$; $RSS = 38772$.)

Altitude (m)



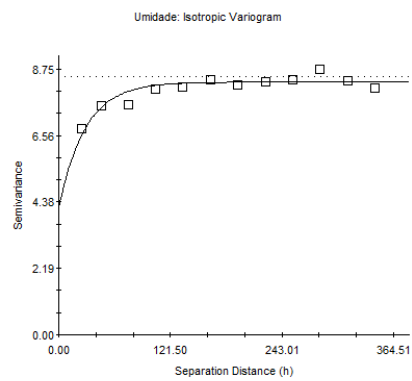
Exponential model ($C_0 = 0,06219$; $C_0 + C = 0,59900$; $A_0 = 15,25$; $r^2 = 0,713$; $RSS = 7,356E-03$)

CEa₂₀ (mS m⁻¹)



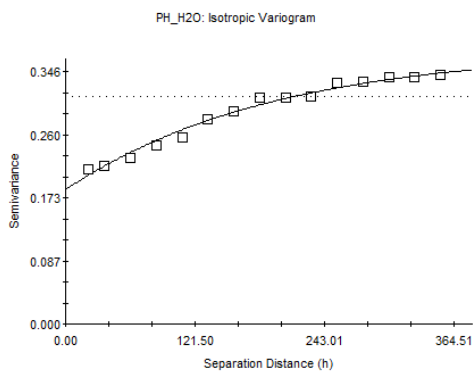
Exponential model ($C_0 = 0,252$; $C_0 + C = 0,504$; $A_0 = 31,60$; $r^2 = 0,804$; $RSS = 2,900E-03$)

CEa₄₀ (mS m⁻¹)



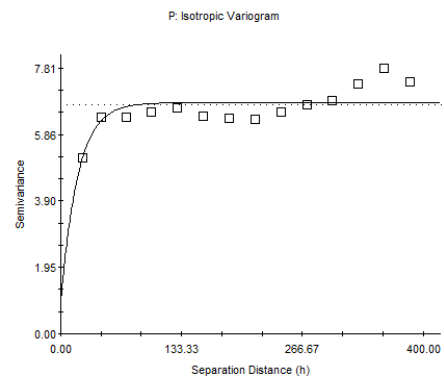
Exponential model ($C_0 = 4,160$; $C_0 + C = 8,321$; $A_0 = 29,00$; $r^2 = 0,829$; $RSS = 0,561$)

Umidade (kg kg⁻¹)



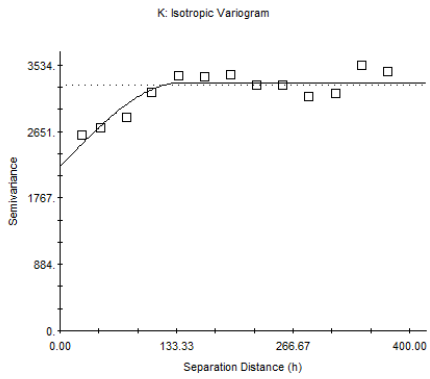
Exponential model ($C_0 = 0,18400$; $C_0 + C = 0,37600$; $A_0 = 195,000$; $r^2 = 0,984$; $RSS = 5,033E-04$)

pH



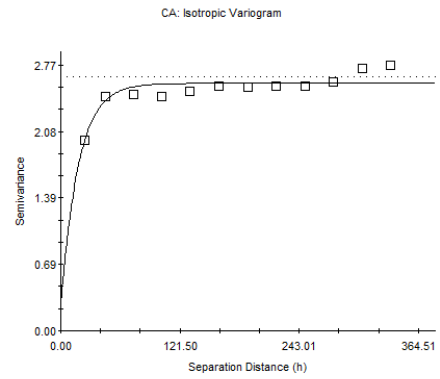
Exponential model ($C_0 = 0,870$; $C_0 + C = 6,795$; $A_0 = 18,60$; $r^2 = 0,487$; $RSS = 2,63$)

Fósforo (mg dm⁻³)



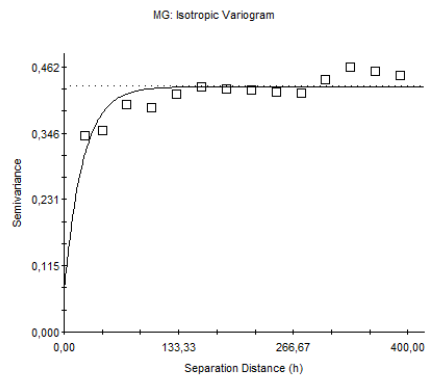
Spherical model (Co = 2184.161; Co + C = 3300.628; Ao = 139.02; r2 = 0.803; RSS = 206122.)

Potássio (mg dm⁻³)



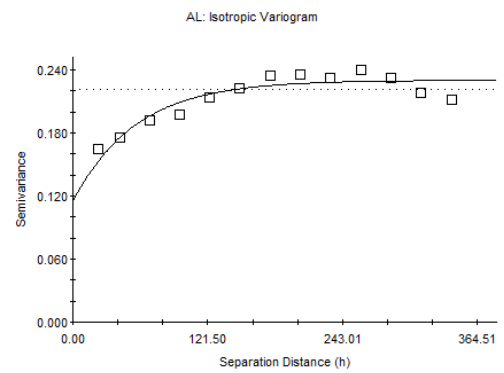
Exponential model (Co = 0.241; Co + C = 2.583; Ao = 17.80; r2 = 0.773; RSS = 0.0960)

Cálcio (cmolc dm⁻³)



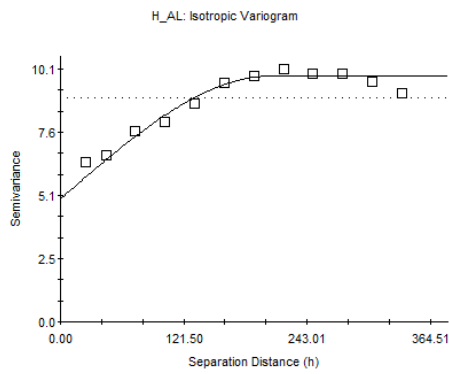
Exponential model (Co = 0.06900; Co + C = 0.42700; Ao = 21.80; r2 = 0.630; RSS = 6.212E-03)

Magnésio (cmolc dm⁻³)



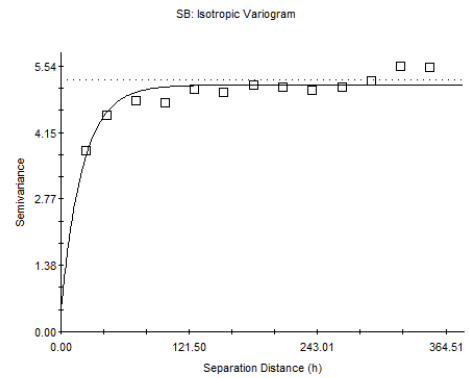
Exponential model (Co = 0.115; Co + C = 0.231; Ao = 56.60; r2 = 0.859; RSS = 1.023E-03)

Acidez trocável - Al³⁺ (cmolc dm⁻³)



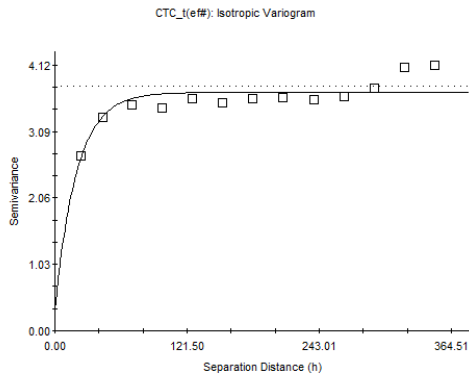
Spherical model (Co = 4.92000; Co + C = 9.85000; Ao = 208.700; r2 = 0.956; RSS = 1.18)

Acidez potencial H+Al (cmolc dm⁻³)



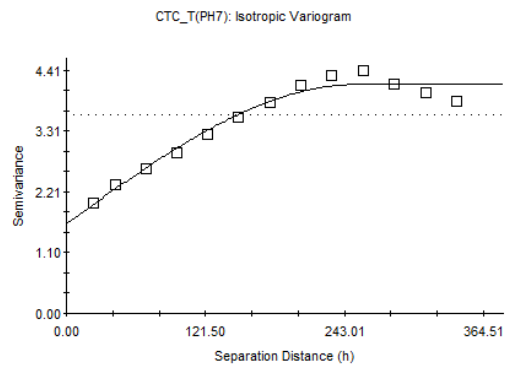
Exponential model (Co = 0.490; Co + C = 5.143; Ao = 20.70; r2 = 0.798; RSS = 0.501)

Soma de bases - SB (cmolc dm⁻³)



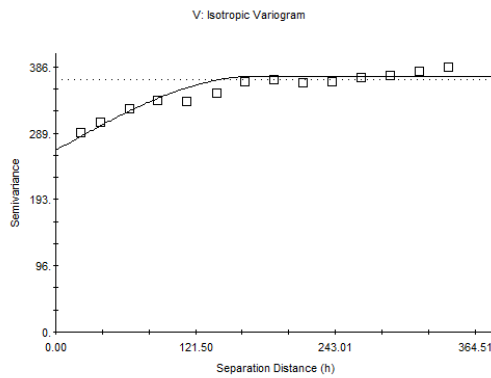
Exponential model ($C_0 = 0.340$; $C_0 + C = 3.693$; $A_0 = 20.10$; $r_2 = 0.683$; $RSS = 0.459$)

CTC efetiva (cmolc dm⁻³)



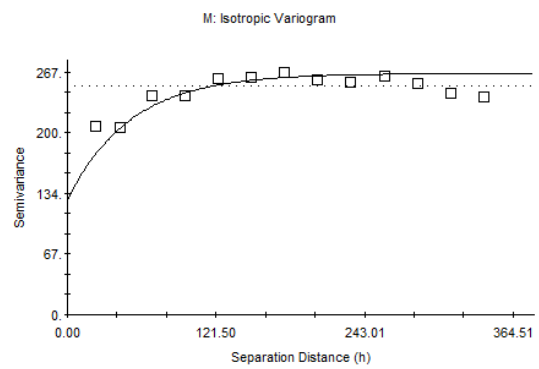
Spherical model ($C_0 = 1.627$; $C_0 + C = 4.160$; $A_0 = 253.70$; $r_2 = 0.967$; $RSS = 0.257$)

CTC à pH 7 (cmolc dm⁻³)



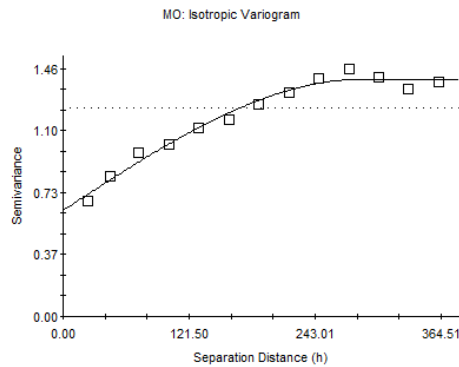
Spherical model ($C_0 = 284.177$; $C_0 + C = 372.046$; $A_0 = 173.58$; $r_2 = 0.895$; $RSS = 1326$.)

Satuação por bases - V (%)



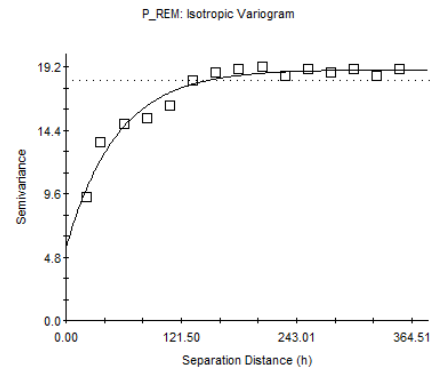
Exponential model ($C_0 = 127.090$; $C_0 + C = 265.811$; $A_0 = 51.85$; $r_2 = 0.753$; $RSS = 2530$.)

Satuação por alumínio - m (%)



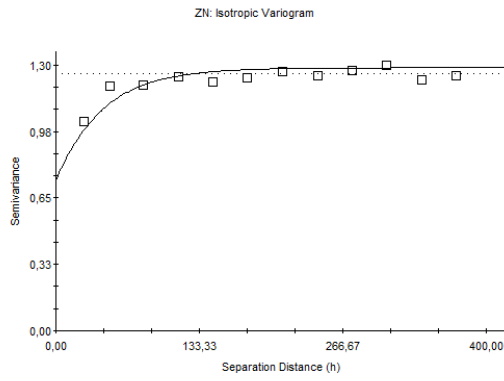
Spherical model ($C_0 = 0.62400$; $C_0 + C = 1.39800$; $A_0 = 289.500$; $r_2 = 0.979$; $RSS = 0.0154$)

Materia orgânica (dag kg⁻¹)



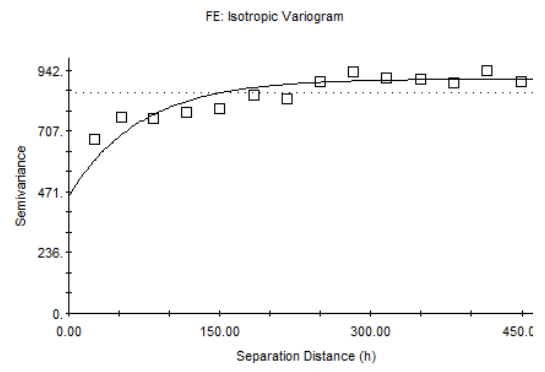
Exponential model ($C_0 = 5.48000$; $C_0 + C = 18.97000$; $A_0 = 53.600$; $r_2 = 0.956$; $RSS = 4.99$)

Fósforo remanescente - (mg L⁻¹)



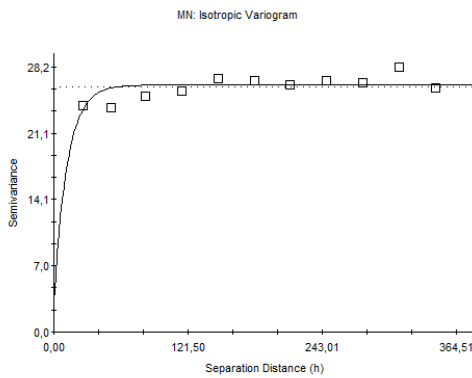
Exponential model (Co = 0,73200; Co + C = 1,28700; Ao = 43,33; r2 = 0,847; RSS = 0,0197)

Zinco (mg dm^{-3})



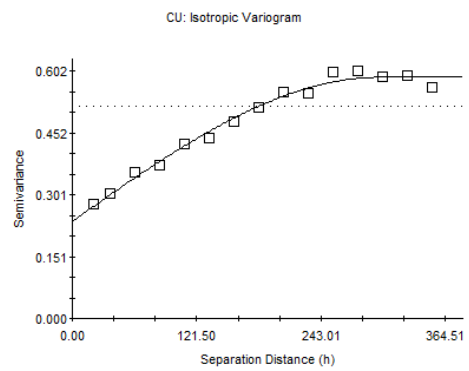
Exponential model (Co = 455,000; Co + C = 910,100; Ao = 70,90; r2 = 0,808; RSS = 23429.)

Ferro (mg dm^{-3})



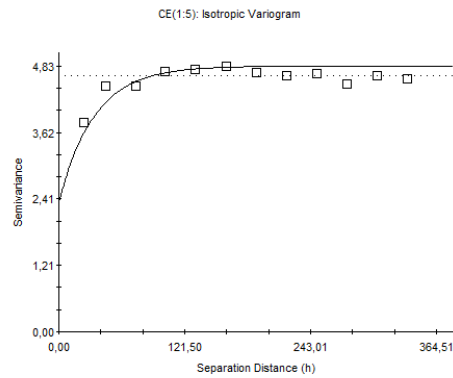
Exponential model (Co = 3,15000; Co + C = 26,25000; Ao = 12,10; r2 = 0,313; RSS = 11,3)

Manganês (mg dm^{-3})



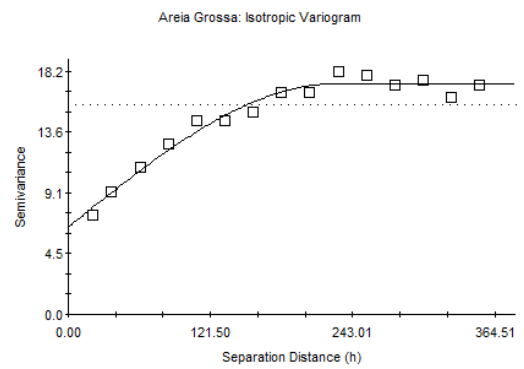
Spherical model (Co = 0,23700; Co + C = 0,58800; Ao = 300,400; r2 = 0,986; RSS = 2,410E-03)

Cobre (mg dm^{-3})



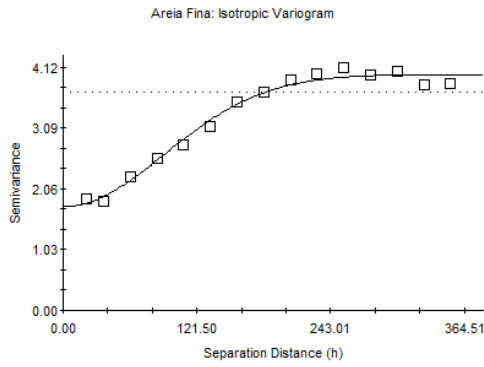
Exponential model (Co = 2,37000; Co + C = 4,83000; Ao = 34,43; r2 = 0,819; RSS = 0,376)

CE (1:5) (mS m^{-1})



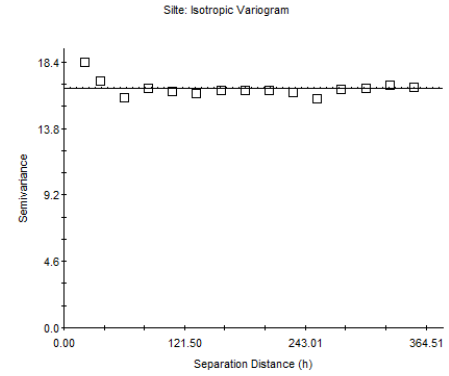
Spherical model (Co = 6,520; Co + C = 17,250; Ao = 228,60; r2 = 0,967; RSS = 5,03)

Areia Grossa (kg kg^{-1})



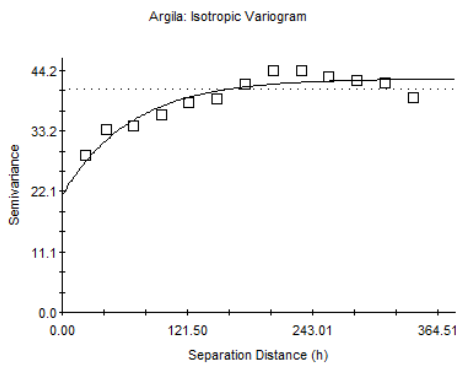
Gaussian model ($C_0 = 1.760$; $C_0 + C = 4.004$; $A_0 = 129.60$; $r^2 = 0.985$; $RSS = 0.143$)

Areia Fina (kg kg^{-1})



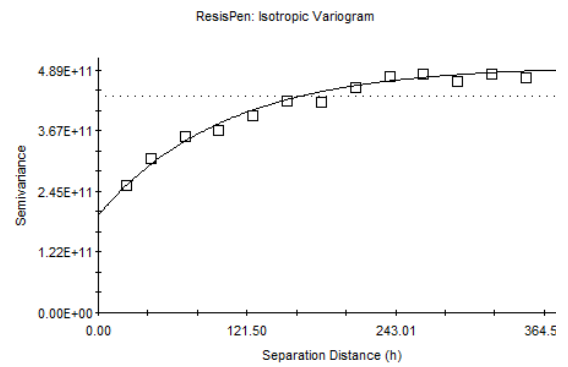
Linear model ($C_0 = 16.603$; $C_0 + C = 16.603$; $A_0 = 351.93$; $r^2 = 0.118$; $RSS = 4.95$)

Silte (kg kg^{-1})



Exponential model ($C_0 = 21.37000$; $C_0 + C = 42.75000$; $A_0 = 67.00$; $r^2 = 0.878$; $RSS = 34.5$)

Teor de argila (kg kg^{-1})

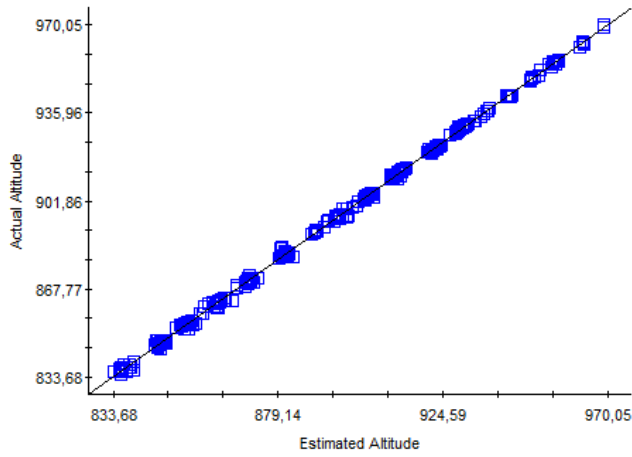


Exponential model ($C_0 = 196930174937.147$; $C_0 + C = 498080054196.253$; $A_0 = 103.85$; $r^2 = 0.981$; $RSS = 1.56E+21$)

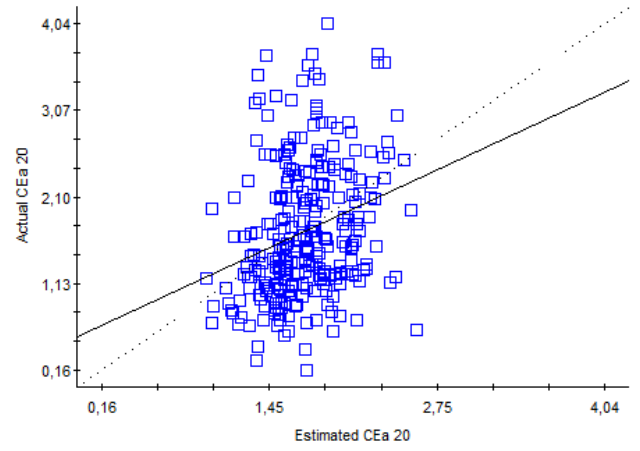
Resistencia do solo à penetração (MPa)

Apêndice B

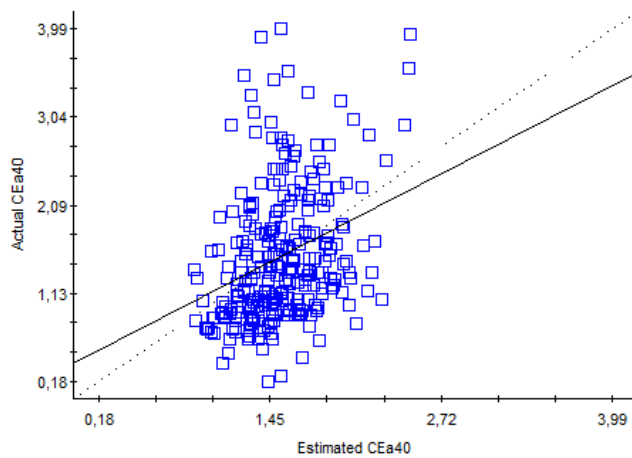
Validação Cruzada das interpolações realizadas por krigagem em 2015



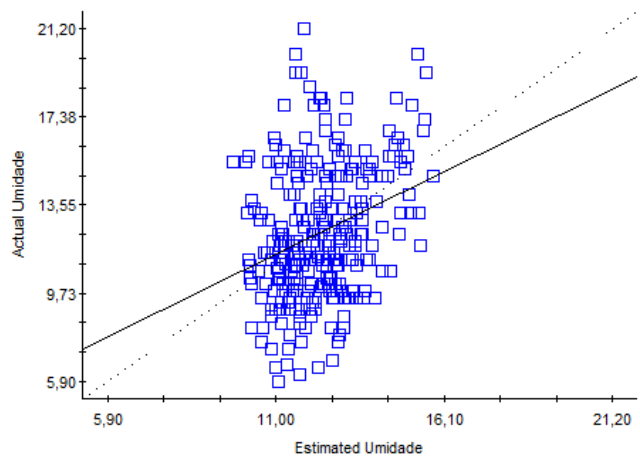
Altitude (m)



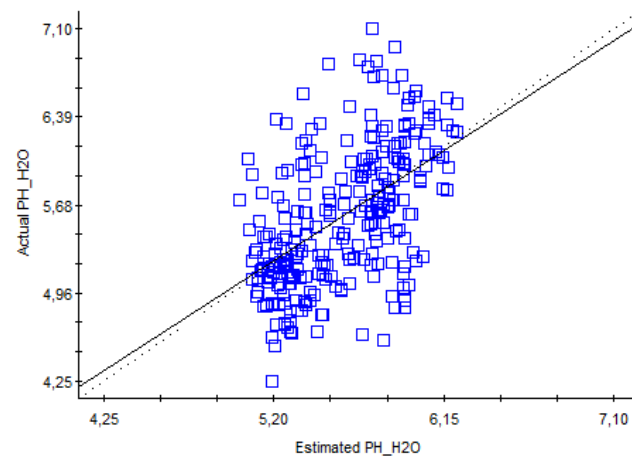
CE_a20 (mS m⁻¹)



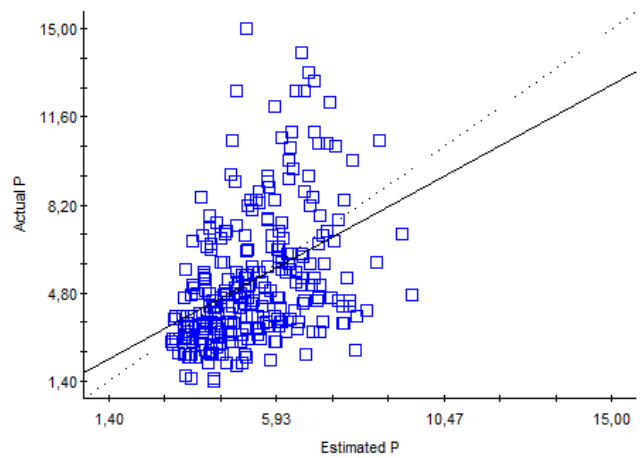
CE_a40 (mS m⁻¹)



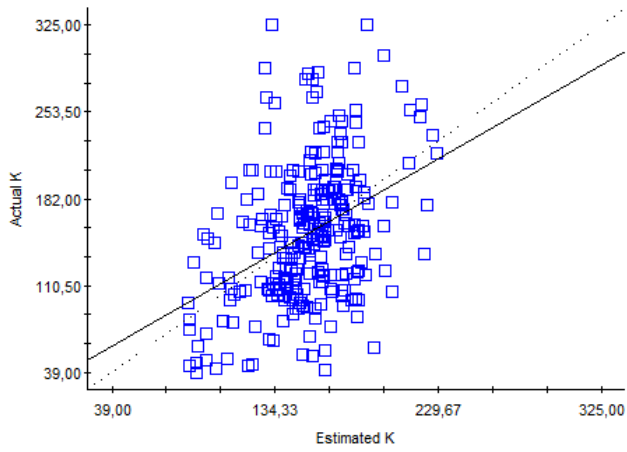
Umidade (kg kg⁻¹)



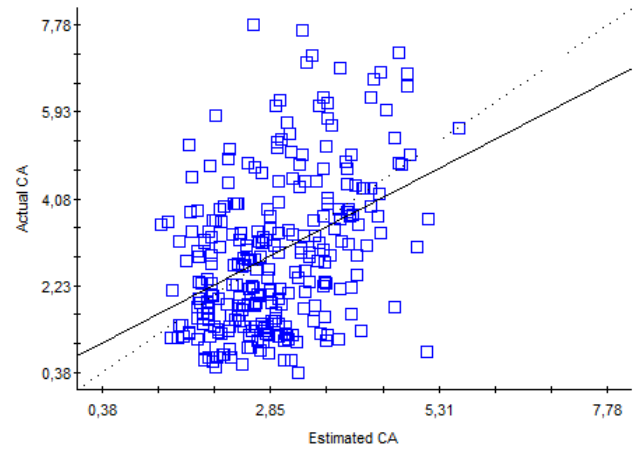
pH



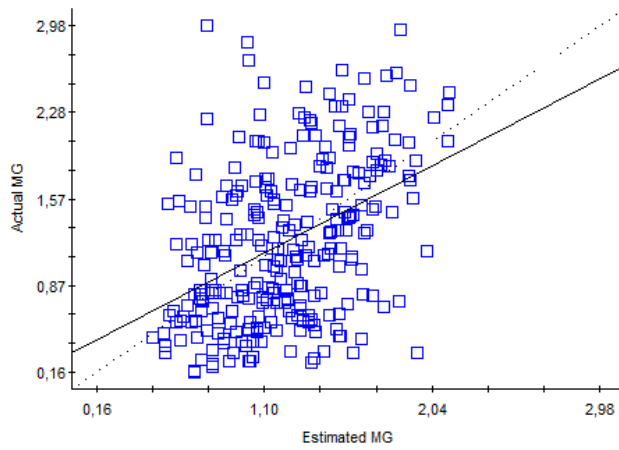
Fósforo (mg dm⁻³)



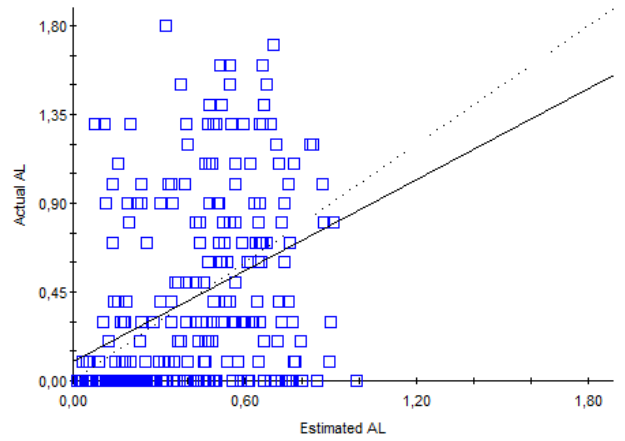
Potássio (mg dm^{-3})



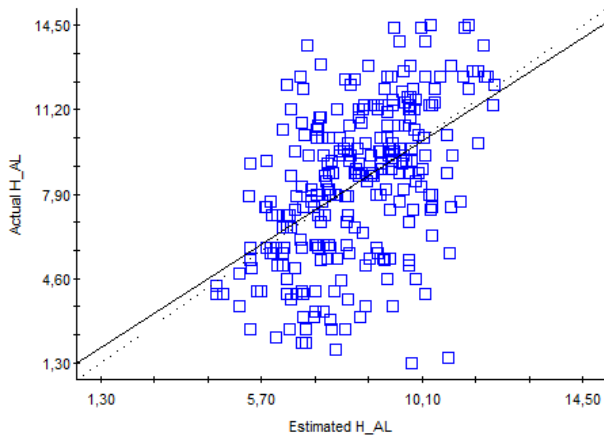
Cálcio (cmolc dm^{-3})



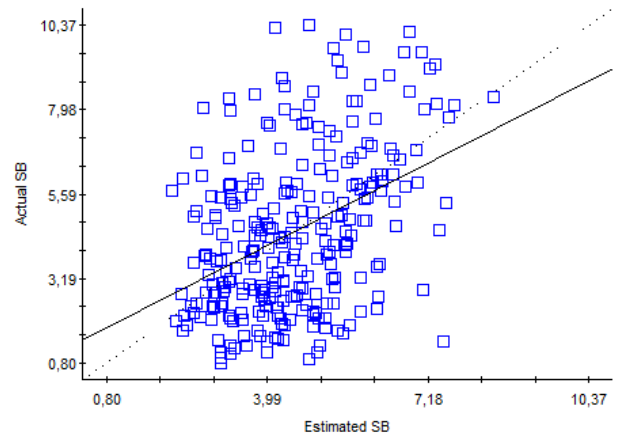
Magnésio (cmolc dm^{-3})



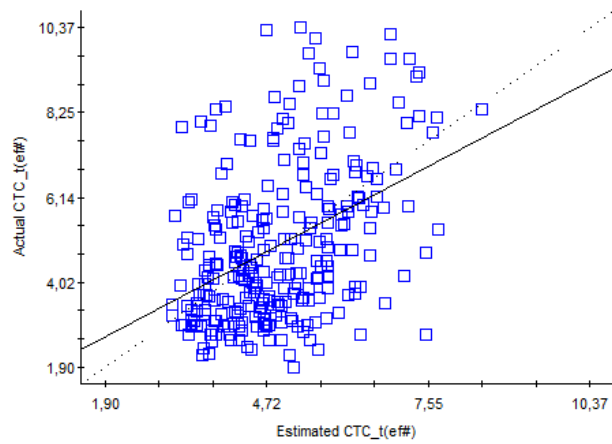
Acidez trocável - Al^{3+} (cmolc dm^{-3})



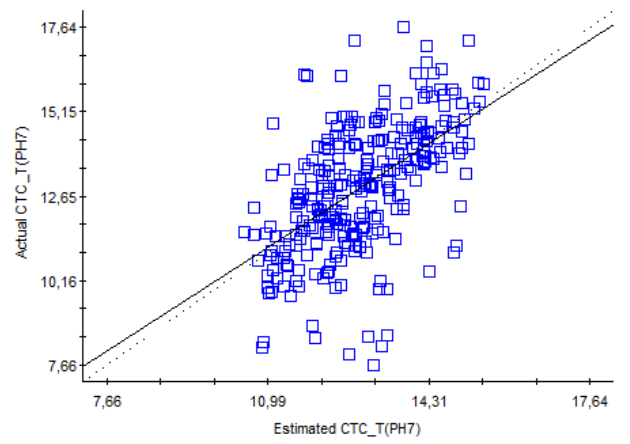
Acidez potencial - $\text{H}+\text{Al}$ (cmolc dm^{-3})



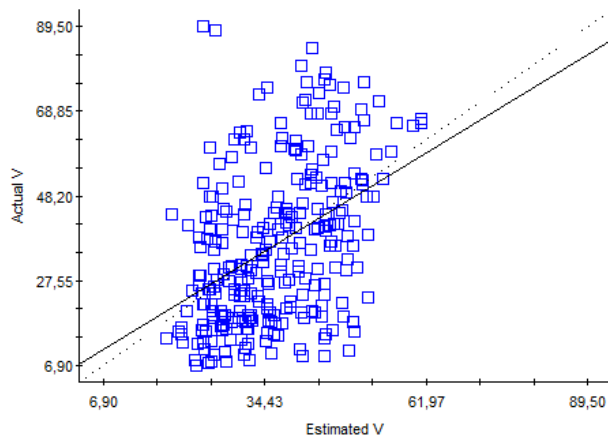
Soma de bases - SB (cmolc dm^{-3})



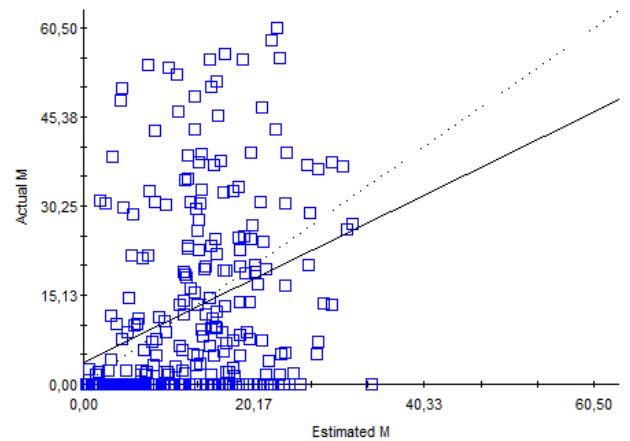
CTC efetiva (cmolc dm⁻³)



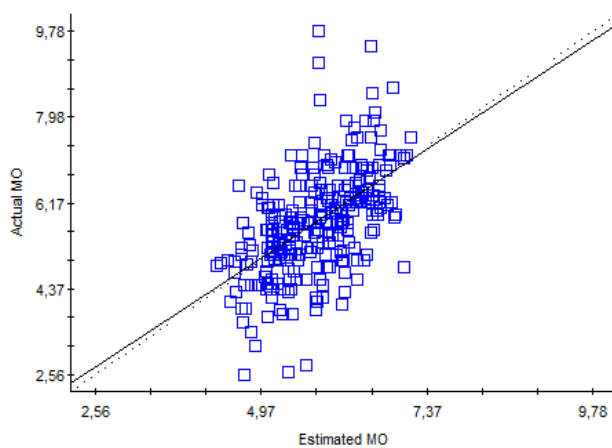
CTC à pH 7 (cmolc dm⁻³)



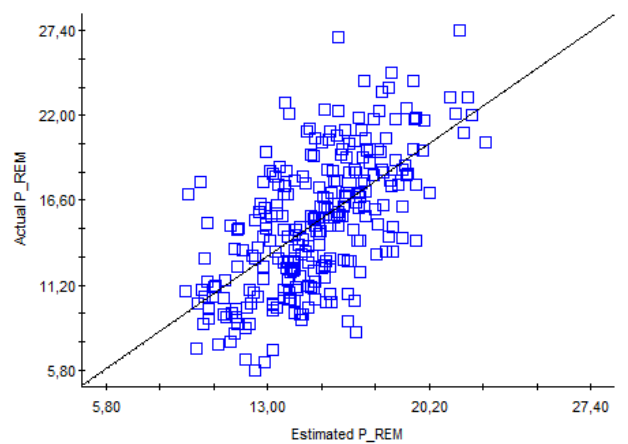
Saturação por bases - V (%)



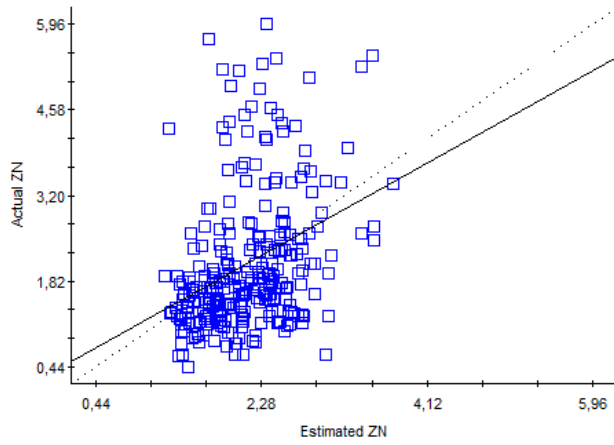
Saturação por alumínio - m (%)



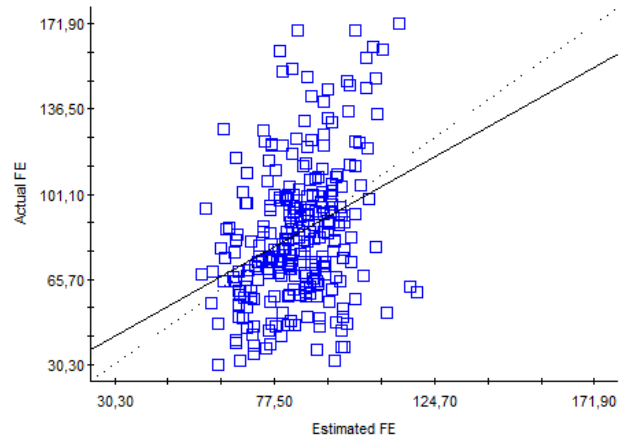
Matéria orgânica (dag kg⁻¹)



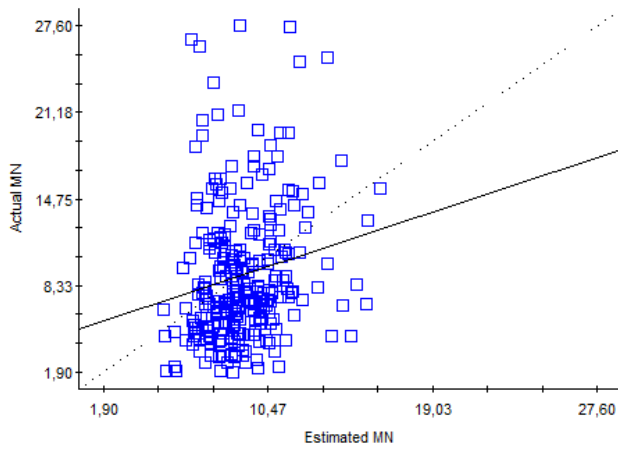
Fósforo remanescente - P-Rem (mg L⁻¹)



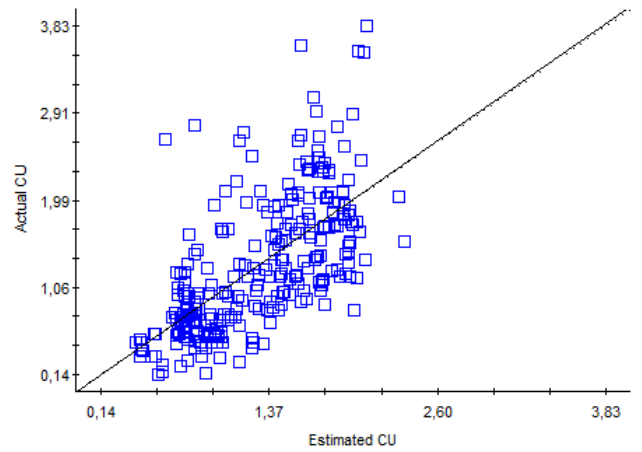
Zinco (mg dm^{-3})



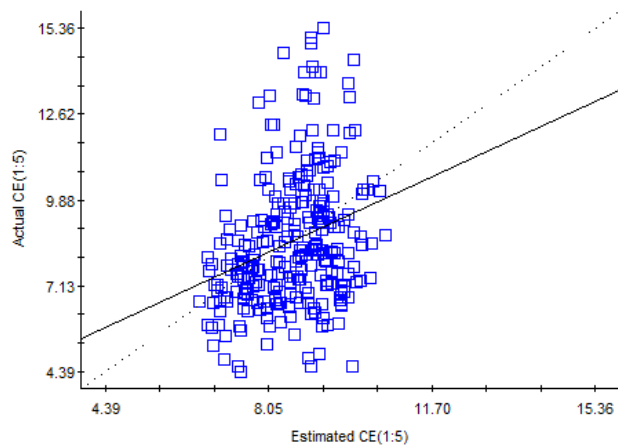
Ferro (mg dm^{-3})



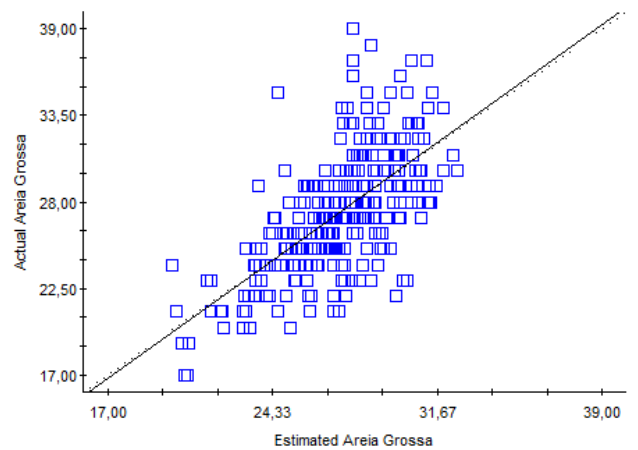
Mangânês (mg dm^{-3})



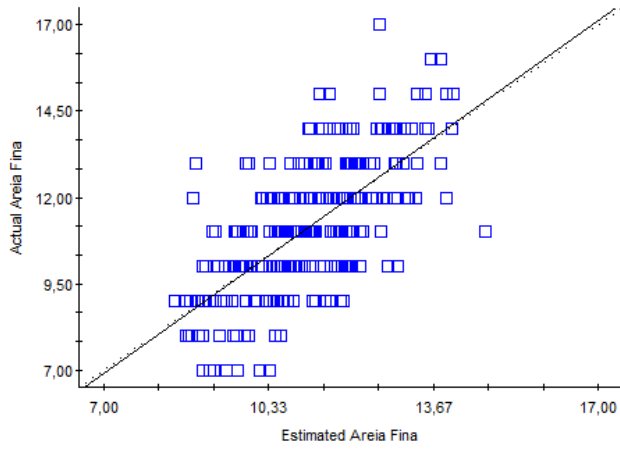
Cobre (mg dm^{-3})



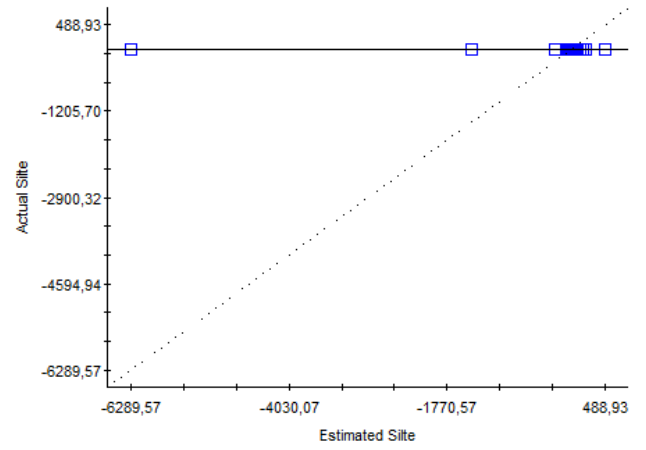
CE_{es} (1:5) (mS m^{-1})



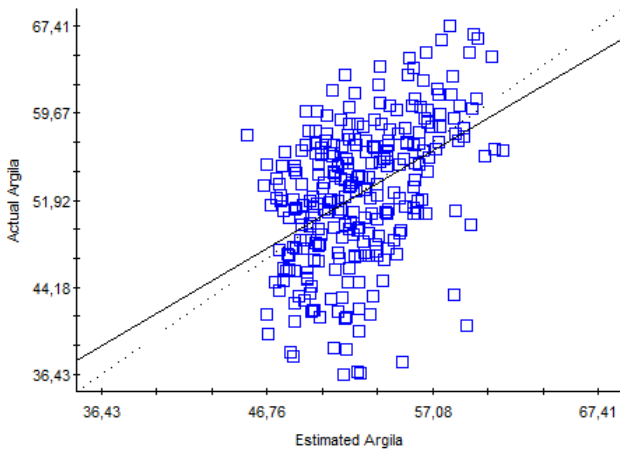
Areia Grossa (kg kg^{-1})



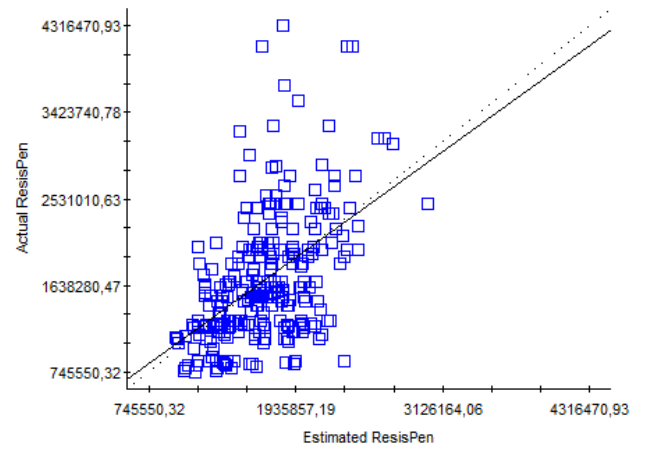
Areia Fina (kg kg⁻¹)



Silte (kg kg⁻¹)



Teor de argila (kg kg⁻¹)



Resistencia do solo à penetração (MPa)

Apêndice C

Mapas dos atributos classificados em 2015

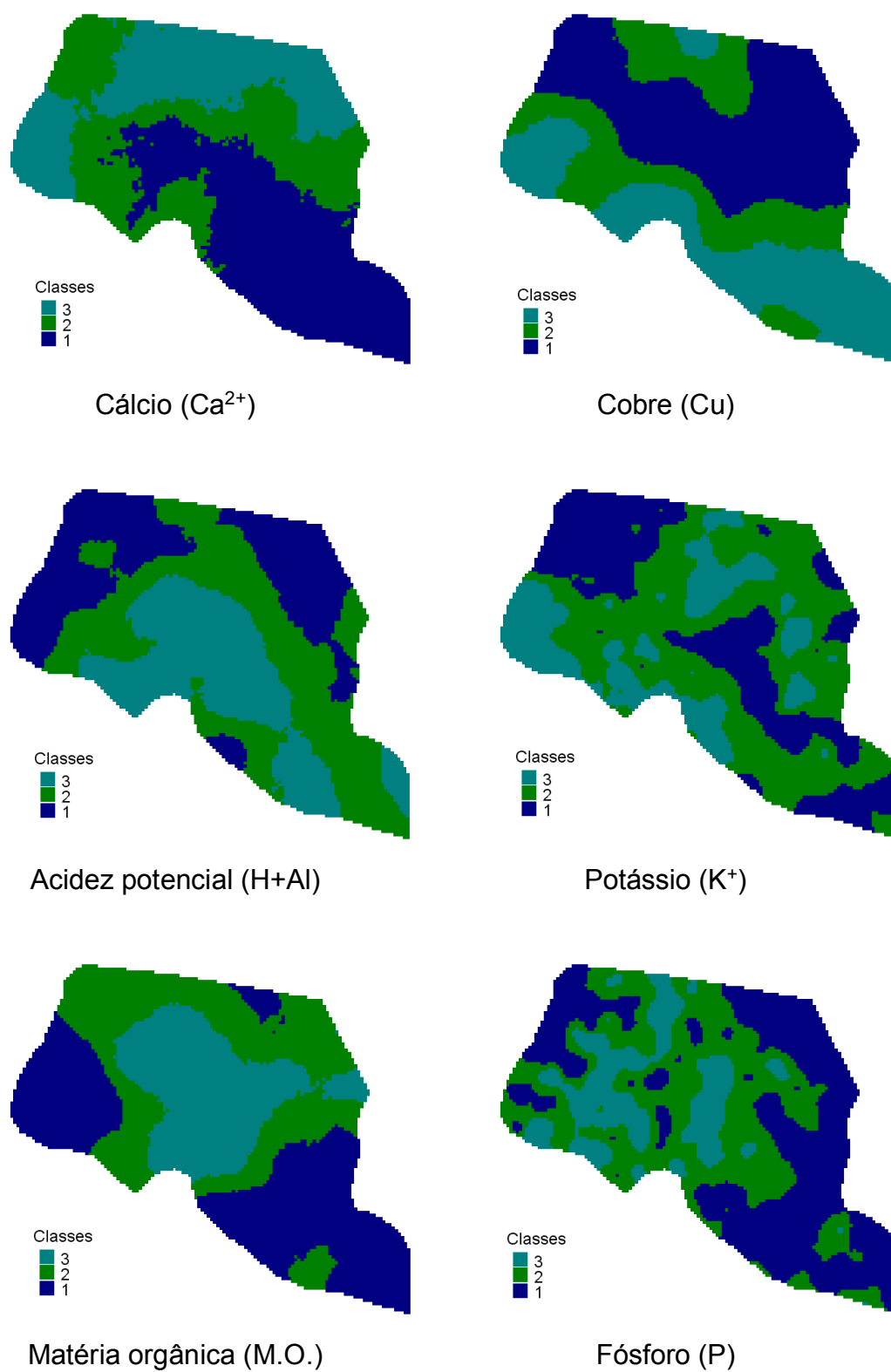
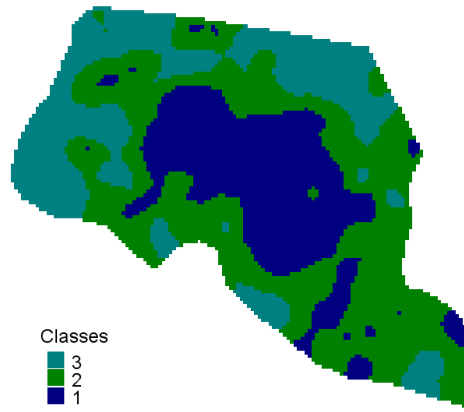
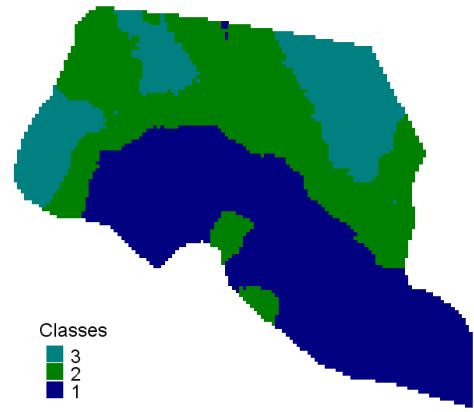


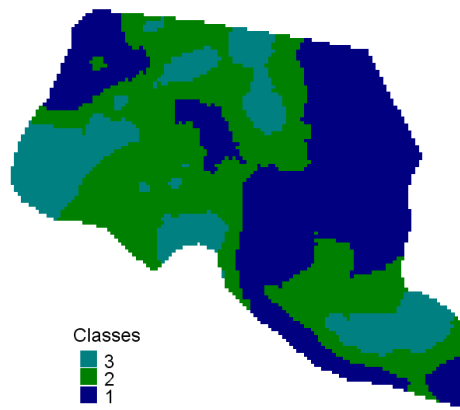
Figura C 1. Mapas dos atributos classificados em três classes.



Fósforo Remanescente (P_rem)



pH (PH_H2O)



Zinco (Zn)

Figura C 2. (Continuação) Mapas dos atributos classificados em três classes.

Apêndice D
Comparação entre os mapas das propriedades no ano de 2009 e 2015

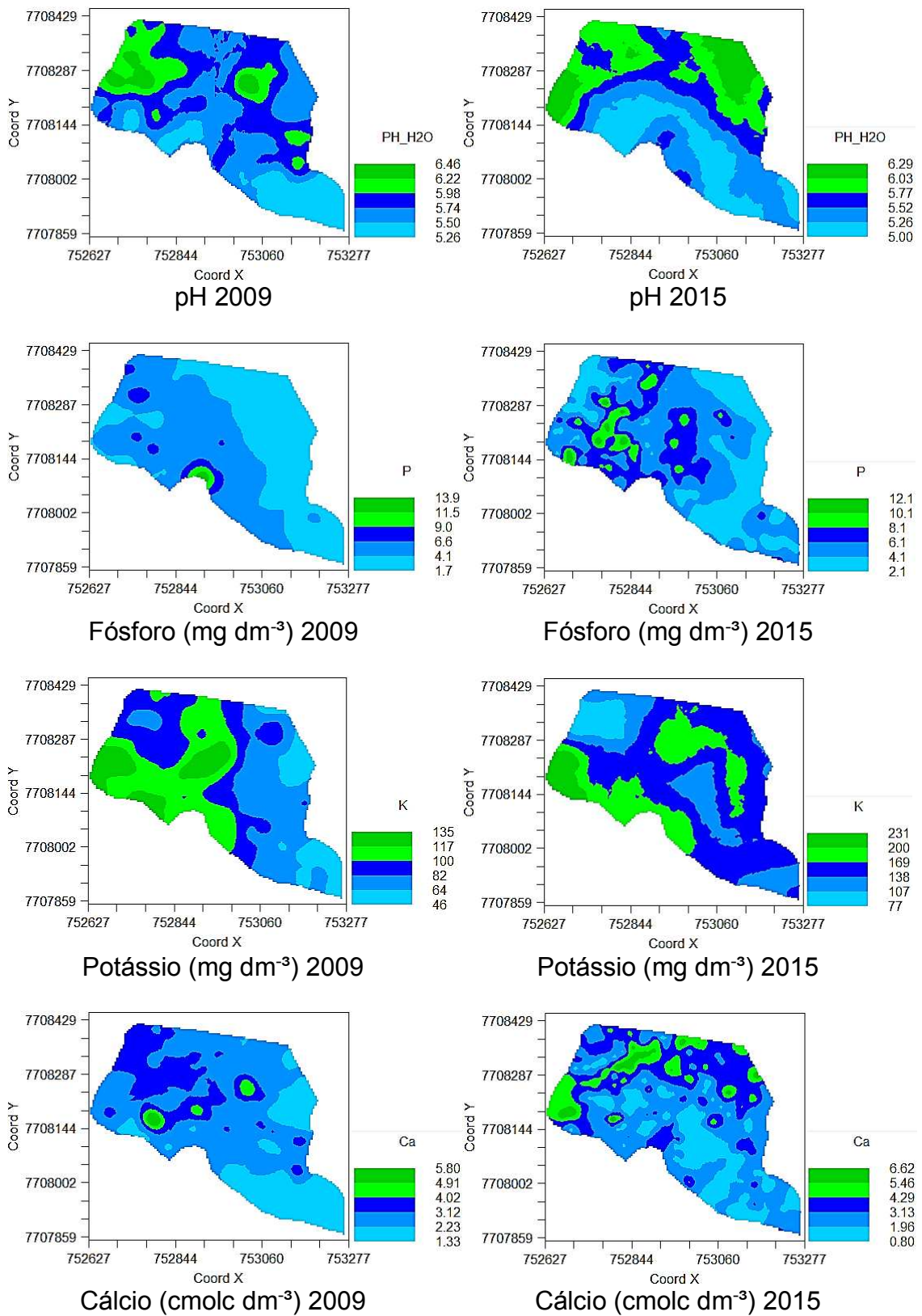


Figura D 1. Comparação entre os mapas dos atributos do solo em 2009 e 2015.

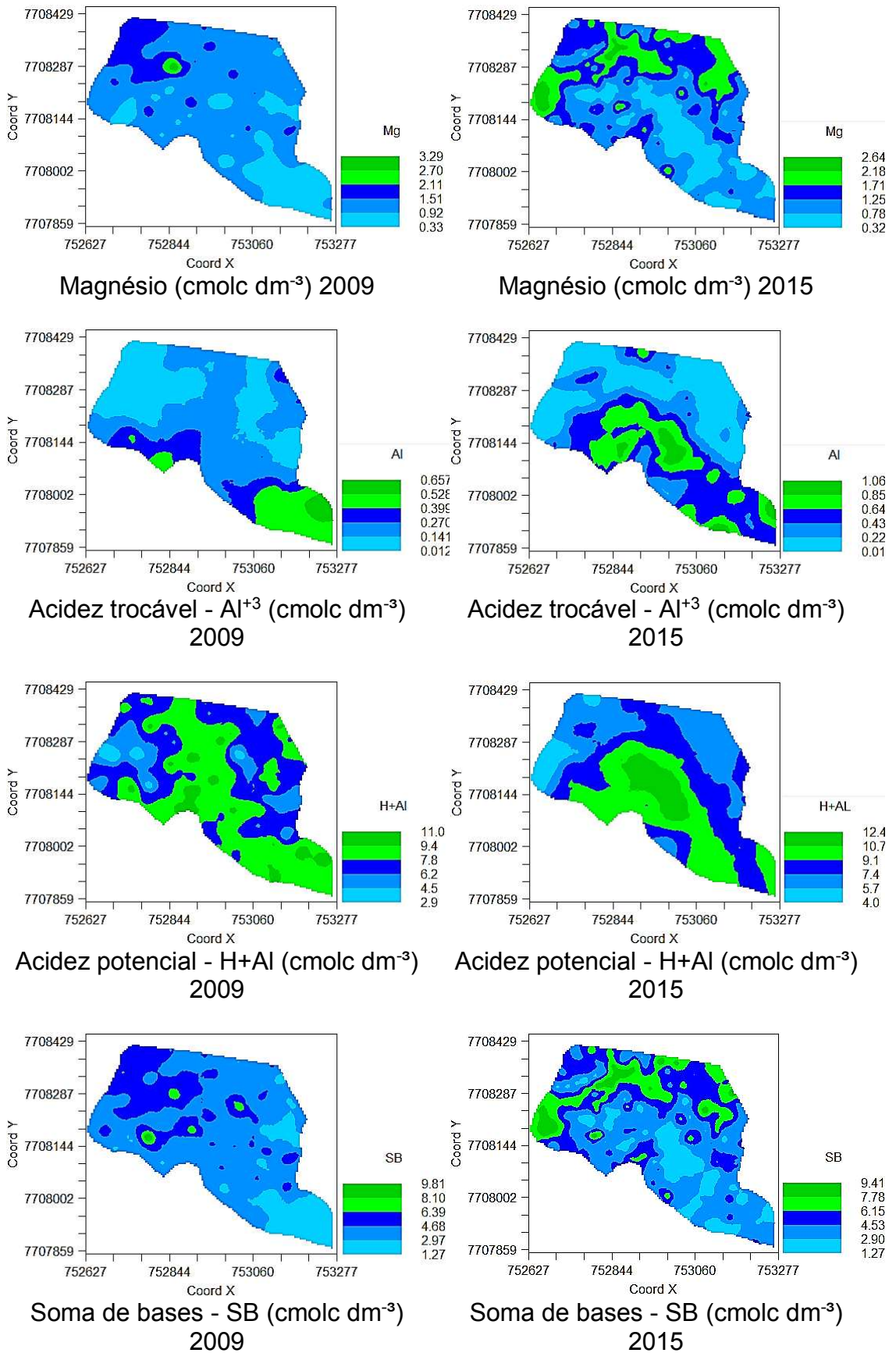


Figura D 2. (Continuação) Comparação entre os mapas dos atributos do solo em 2009 e 2015.

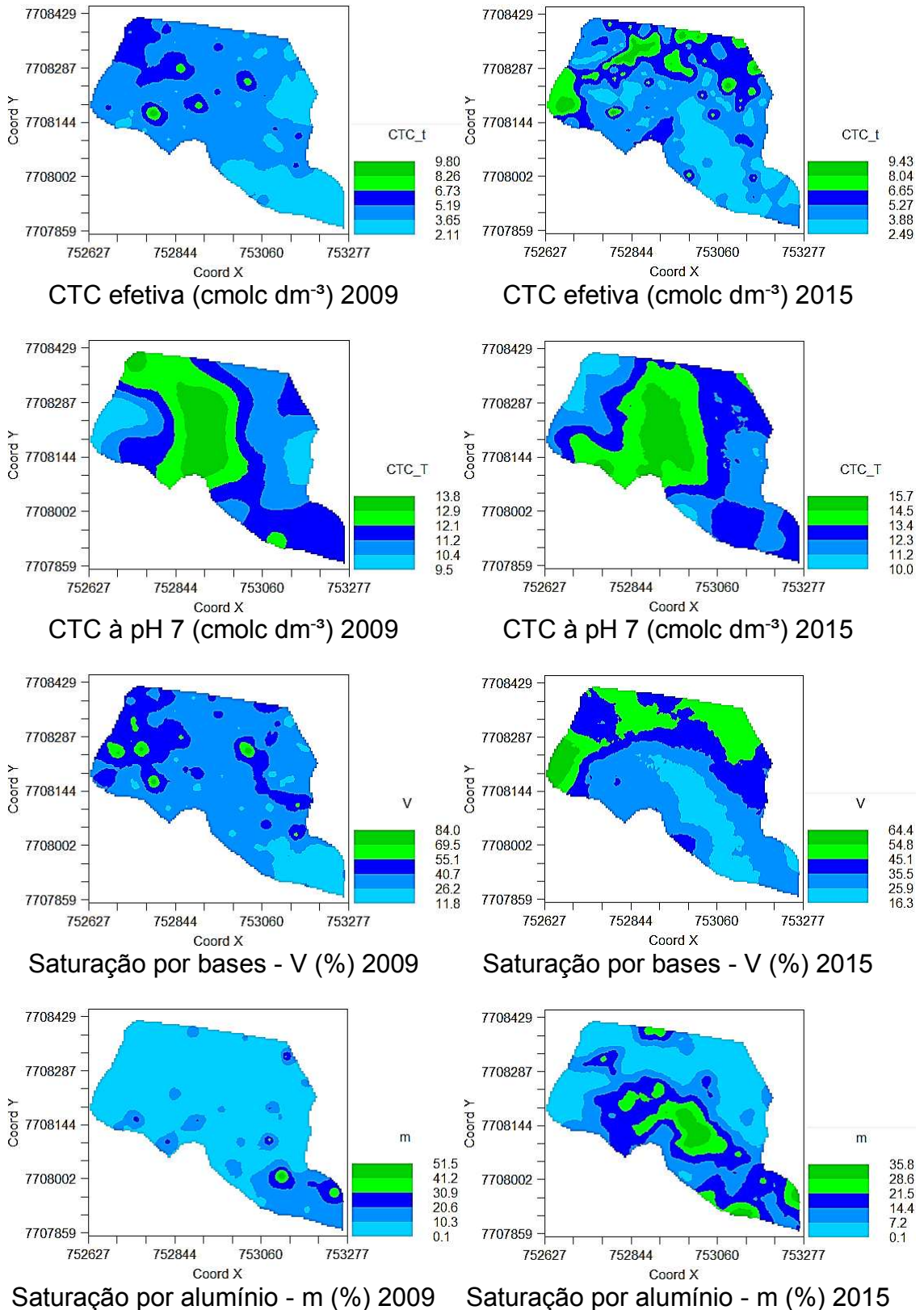


Figura D 3. (Continuação) Comparação entre os mapas dos atributos do solo em 2009 e 2015.

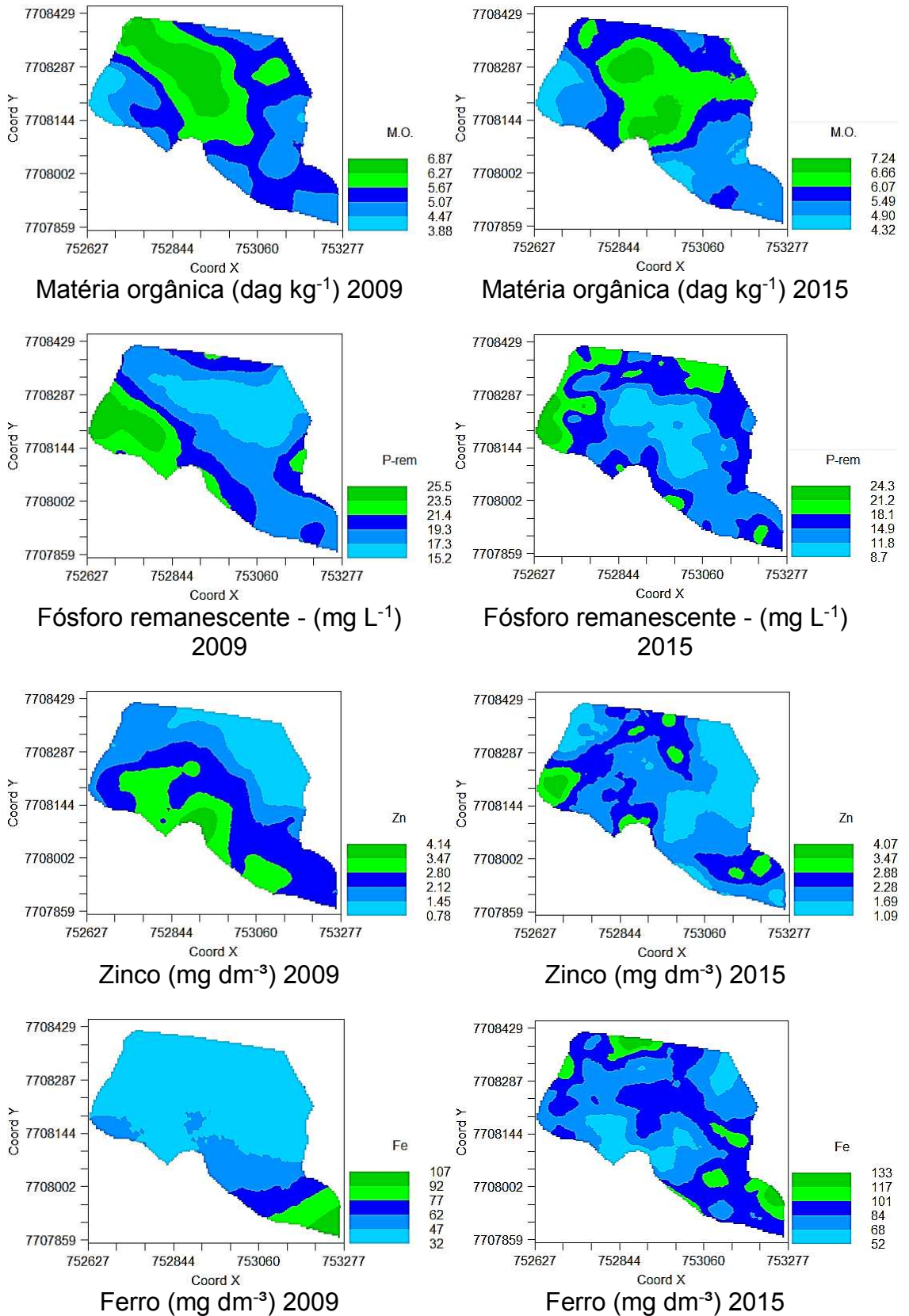
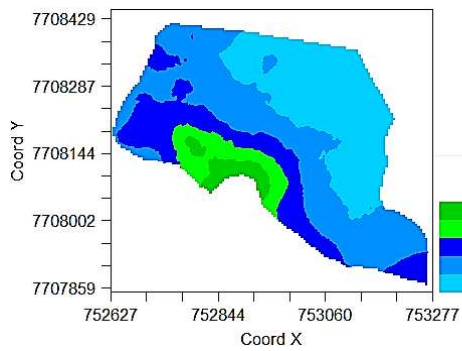
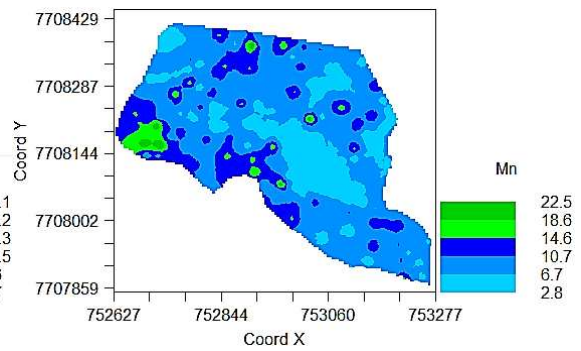


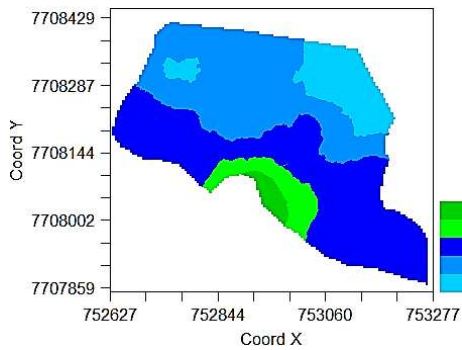
Figura D 4. (Continuação) Comparação entre os mapas dos atributos do solo em 2009 e 2015.



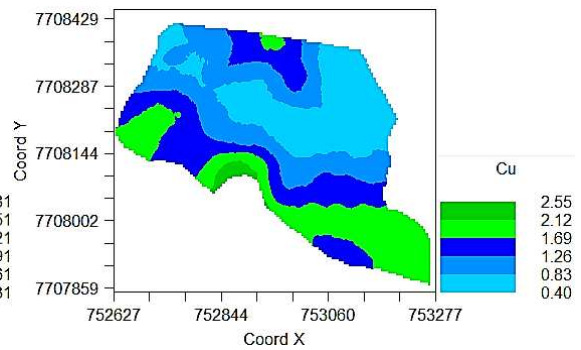
Manganês (mg dm⁻³) 2009



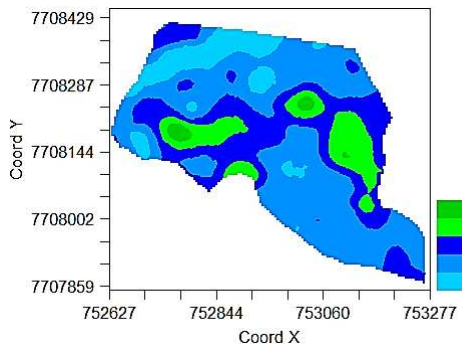
Manganês (mg dm⁻³) 2015



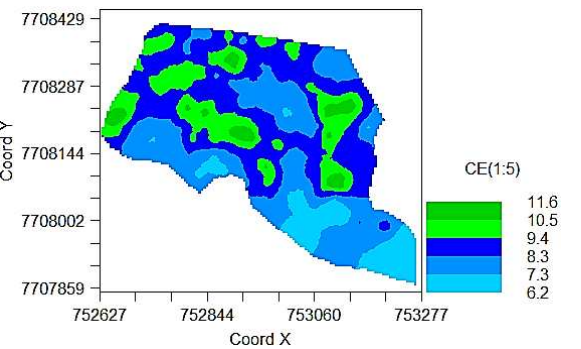
Cobre (mg dm⁻³) 2009



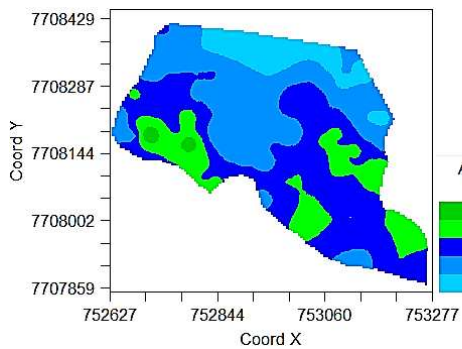
Cobre (mg dm⁻³) 2015



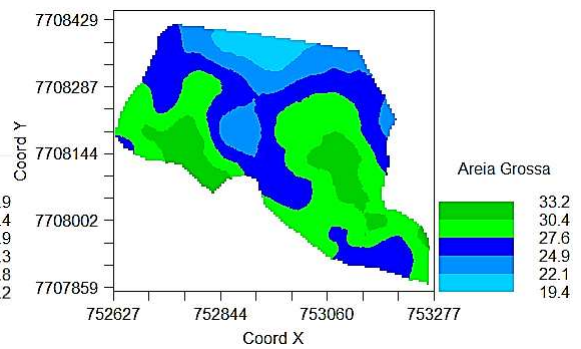
CE (1:5) (mS m⁻¹) 2009



CE (1:5) (mS m⁻¹) 2015

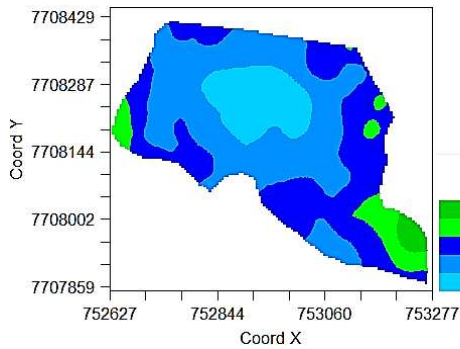


Areia Grossa (kg kg⁻¹) 2009

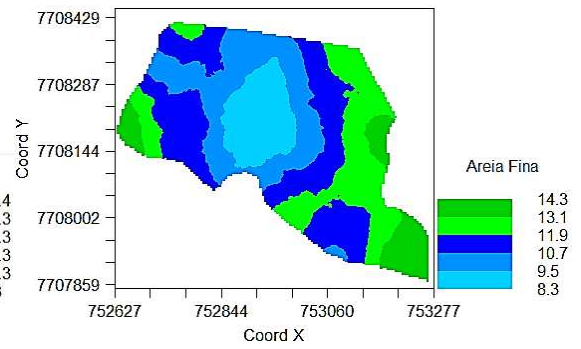


Areia Grossa (kg kg⁻¹) 2015

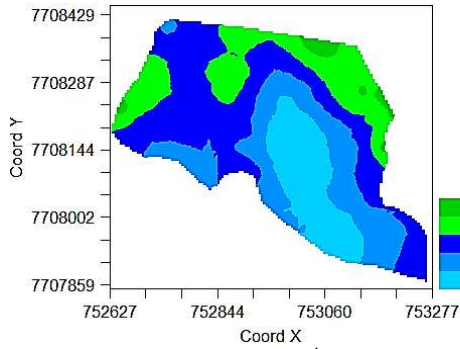
Figura D 5. (Continuação) Comparação entre os mapas dos atributos do solo em 2009 e 2015.



Areia Fina (kg kg⁻¹) 2009

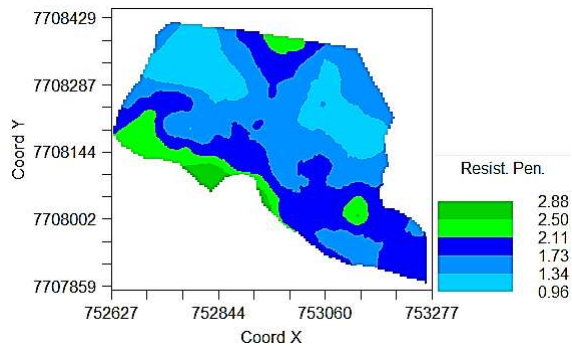


Areia Fina (kg kg⁻¹) 2015



Silte (kg kg⁻¹) 2009

Em 2015 não foi possível gerar o mapa de variabilidade espacial do silte devido ao mesmo ter apresentado efeito pepita puro.



Resistência do solo à penetração (MPa) 2015

Figura D 6. (Continuação) Comparação entre os mapas dos atributos do solo em 2009 e 2015.