

CLARISSA GUSMÃO FIGUEIRÓ

**CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO
VEGETAL EM ESTOQUES INDUSTRIAIS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

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

T

F475c
2018 Figueiró, Clarissa Gusmão, 1992-
Caracterização espacial das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais / Clarissa Gusmão Figueiró. - Viçosa, MG, 2018. viii, 92 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 41-43.

1. Carvão vegetal. 2. Carvão vegetal - Controle de qualidade. 3. Análise espacial (Estatística). 4. Análise de componentes principais. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.98675

CLARISSA GUSMÃO FIGUEIRÓ


**CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO
VEGETAL EM ESTOQUES INDUSTRIAIS**

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


APROVADA: 27 de fevereiro de 2018



Benedito Rocha Vital




Gérson Rodrigues dos Santos



Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho



Vinícius Resende de Castro



Angélica de Cassia Oliveira Carneiro
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por proporcionar tantas alegrias em minha vida.

Aos meus pais, Geraldo José e Márlia, por todo apoio e carinho. São meus maiores exemplos de amor e dedicação.

Ao Lucas, por estar sempre ao meu lado e pelo carinho, além da grande contribuição no trabalho.

Às Marinas pelo companheirismo e amor.

À Ailton e Rita pelo grande apoio e acolhimento durante a graduação e mestrado.

Aos meus amigos e familiares por todo o incentivo e ajuda.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal pela oportunidade.

À toda a equipe da Aperam BioEnergia pela oportunidade e confiança em realizar este trabalho.

À minha orientadora, Angélica de Cassia Oliveira Carneiro, pela confiança e orientação durante toda esta etapa.

Ao Professor Gérson e sua equipe pelo grande auxílio nas análises estatísticas

À Jessica Dornelas Soares e ao Paulo Victor Oliveira de Souza, pela amizade e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos e funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM – DEF/UFV) pela amizade e ajuda. Em especial ao Carlos Miguel, Eder Cabral, e Lawrence Pires.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao projeto PNUD pelo apoio financeiro ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira.

Ao Hugo e a Mayra pela ajuda com as figuras, esquemas e desenhos técnicos.

OBRIGADO!

BIOGRAFIA

CLARISSA GUSMÃO FIGUEIRÓ, filha de Geraldo José Moreira Figueiró e Márlia Maria Campos Gusmão Figueiró, nasceu em 8 de julho de 1992 na cidade de Itamarandiba, Minas Gerais, onde concluiu o Ensino Fundamental. Concluiu o ensino médio na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Em 2010 ingressou no curso superior de Agronomia, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa - MG.

Do qual transferiu para o curso superior de Engenharia Florestal, em 2013, pela mesma instituição de ensino.

Em janeiro de 2012 ingressou na pesquisa, trabalhando nos Laboratórios de Painéis e Energia da Madeira e de Propriedades da Madeira.

Em julho de 2014 e entre janeiro e março 2015 estagiou na empresa Aperam BioEnergia Ltda, no setor de Melhoramento Florestal e Carvão Vegetal, respectivamente, nas cidades de Itamarandiba-MG e Capelinha-Mg.

Entre janeiro e fevereiro de 2016 estagiou na empresa ArcelorMittal Bioflorestas Ltda, no setor de Carvão vegetal em Martinho Campos-MG.

Em janeiro de 2016, concluiu o curso de Engenharia Florestal e, em março deste mesmo ano, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo os requisitos necessários à obtenção do título de *Magister Scientiae* em fevereiro de 2018.

De janeiro a junho de 2017 realizou um período sanduiche na University of New Brunswick em Fredericton-NB no Canadá, sob orientação do Doutor Stewart I. Cameron.

Em fevereiro de 2018 concluiu os requisitos necessários à obtenção do título de *Magister Scientiae*.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. Produção de carvão vegetal no Brasil	4
3.2. Distribuição espacial	5
3.3. Análise de componentes principais	5
3.4. Aprendizagem de máquina	6
4. MATERIAL E MÉTODOS	7
4.1. Local de estudo	7
4.2. Madeira	7
4.3. Fornos	7
4.4. Produção de carvão vegetal	7
4.5. Amostragem do carvão vegetal	9
4.6. Propriedades do carvão vegetal	12
4.7. Análise dos dados	13
4.7.1. Análise descritiva	13
4.7.2. Relação entre as propriedades do carvão vegetal nos estoques dos fornos ..	13
4.7.3. Efeito da posição do estoque nas propriedades do carvão vegetal	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5.1. Análise descritiva dos dados	16
5.2. Relações entre as propriedades do carvão vegetal nos estoques do forno RAC 700 20	
5.3. Relações entre as propriedades do carvão vegetal nos estoques do forno RAC 220 26	
5.4. Efeito da posição nas propriedades do carvão vegetal no estoque do RAC 700 ...	30
5.5. Efeito da posição nas propriedades do carvão vegetal no estoque do RAC 220 ...	39
6. CONCLUSÃO	40
7. REFERENCIAL TEÓRICO	41
ANEXO 1 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA O FORNO RAC 700	44
ANEXO 1A – Estoque 1	44
ANEXO 1B – Estoque 2	50
ANEXO 1C – Estoque 3	56
ANEXO 2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA O FORNO RAC 220	62
ANEXO 2A – Estoque 1	62
ANEXO 2B – Estoque 2	68
ANEXO 2C – Estoque 3	74
ANEXO 3 – VETORES DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA A ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	80
ANEXO 3A – RAC 700	80
ANEXO 3B – RAC 220	84
ANEXO 4 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA AMOSTRAGEM REALIZADA DE ACORDO COM A ABNT NBR 6923 (METODOLOGIA MANUAL DE AMOSTRAGEM USUALMENTE UTILIZADA NAS EMPRESAS DE CARVÃO VEGETAL)	88
ANEXO 5 – CÁLCULO DO NÚMERO DE AMOSTRAS NECESSÁRIO PARA CADA PROPRIEDADE POR MEIO DOS RESULTADOS DA AMOSTRAGEM MECANIZADA ..	90

RESUMO

FIGUEIRÓ, Clarissa Gusmão, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018.
Caracterização espacial das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais.
Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Os crescentes investimentos das empresas do setor de carvão vegetal em fornos de maiores dimensões resultaram em aumento do volume de carvão produzido a cada ciclo de carbonização. No entanto, o controle do processo foi dificultado, uma vez que a o monitoramento da distribuição dos gases, taxa de aquecimento e a temperatura ao longo do forno é mais complexo nestes tipos de fornos, o que pode refletir na variabilidade do carvão vegetal estocado. Neste sentido, é natural que se manifestem incertezas quanto a metodologia de análise de qualidade preconizada pela ABNT NBR 6923, uma vez que esta norma não faz distinção da quantidade amostral de acordo com tamanho do estoque. Deste modo, percebe-se a necessidade de estudos que contribuam para a elucidação de questões relacionadas a amostragem do carvão vegetal, principalmente nos estoques industriais. O objetivo principal deste estudo foi estudar a distribuição espacial das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais visando melhorias no seu controle de qualidade. Para isto, foram amostrados três estoques industriais de carvão vegetal provenientes do forno RAC 700, e três estoques provenientes do RAC 220, pertencentes a empresa Aperam Bioenergia, situada no município de Veredinha, Minas Gerais. Utilizou-se uma metodologia de amostragem mecanizada, em que se estabeleceu, para o RAC 700, 25 pontos de coleta do carvão no estoque, sendo 10 pontos localizados na parte superior e 15 pontos na parte inferior do estoque. Para o RAC 220, foram coletados 15 pontos, sendo 10 localizados na parte inferior e 5 na parte superior. Determinou-se a granulometria média, teor de finos, densidade a granel, teor de carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas para todas as unidades amostrais coletadas. Foi realizada a análise descritiva dos dados dos estoques dos fornos RAC 700 e RAC 220, individualmente, além dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade e Levene para homogeneidade de variância. A determinação da relação entre as propriedades no estoque, foi realizada por meio da combinação das técnicas de análise geoespacial (IDW) e análise de componentes principais. O efeito da posição (comprimento, altura e largura) do estoque nas propriedades do carvão vegetal foi avaliado por meio da análise espacial (IDW) em conjunto a técnica de aprendizagem de máquina (*random forest*). As propriedades do carvão vegetal granulometria média, teor de finos, densidade a granel e teor de cinzas

apresentaram coeficiente de variação médio. Enquanto o teor de carbono fixo apresentou coeficiente de variação baixo. Além disso, pressuposições da estatística paramétrica convencional não foram atendidas para todas as propriedades do carvão vegetal, indicando a necessidade de uso de outra metodologia. Foi observada uma relação negativa entre a granulometria média e teor de finos. Em relação a densidade a granel, verificou-se uma relação positiva com o teor de finos. E, por fim, o teor de carbono fixo apresentou uma relação positiva com teor de cinzas. Observou-se efeito das posições (comprimento, altura e largura) do estoque de carvão vegetal apenas para o forno RAC 700. A utilização da interpolação IDW em conjunto com a análise de componentes principais e aprendizagem de máquinas, possibilitou, por meio das avaliações dos mapas temáticos, a realização de inferências a respeito da qualidade do carvão vegetal em diferentes estoques industriais. Acredita-se que, para a gestão de uma unidade produtora, tais observações permitem a identificação de problemas ao longo processo produtivo, possibilitando solucioná-los antes que causem grandes prejuízos econômicos, melhorando o controle de qualidade da empresa.

ABSTRACT

FIGUEIRÓ, Clarissa Gusmão, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Spatial characterization of charcoal properties in industrial stocks.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

The crescent investments of charcoal companies in larger furnaces resulted in an increase in the volume of charcoal produced at each carbonization cycle. In addition to this, there was a contingent increase of wood, which resulted in greater variability of the wood properties within the same furnace, thus reflecting the variability of the charcoal produced and stocked. In this sense, it is natural to express uncertainties regarding the methodology of quality analysis recommended by ABNT NBR 6923, since this standard does not distinguish the sample quantity according to the size of the stock. In this way, the need for studies that contribute to the elucidation of issues related to charcoal sampling, especially in industrial inventories, is perceived. The main objective of this study was to study the spatial distribution of charcoal properties in industrial stocks aiming at improvements in their quality control. For this, three industrial stocks of charcoal from the RAC 700 furnace were sampled, and three stocks from the RAC 220, belonging to the company Aperam Bioenergia, located in the municipality of Veredinha, Minas Gerais. A mechanized sampling methodology was used in which RAC 700 collected 25 collection points of the coal in the inventory, 10 points located at the top and 15 points at the bottom of the stock. For RAC 220, 15 points were collected, 10 of which were located at the bottom and 5 at the top. The mean particle size, fines content, bulk density, fixed carbon content, volatile materials and ash content were determined for all sample units collected. A descriptive analysis of the RAC 700 and RAC 220 furnace inventories was carried out individually, in addition to the Shapiro-Wilk tests for normality and Levene tests for homogeneity of variance. The determination of the relationship between the properties in the inventory was performed through a combination of geospatial analysis (IDW) and principal components analysis. The effect of the position (length, height and width) of the stock on the charcoal properties was evaluated through the spatial analysis (IDW), together with the random forest technique. The properties of the charcoal medium grain size, fines content, bulk density and ash content showed a mean coefficient of variation. While the fixed carbon content presented low coefficient of variation. Furthermore, assumptions of conventional parametric statistics were not met for all charcoal properties, indicating the need to use another methodology. A negative relationship was observed

between the mean particle size and the fines content. In relation to bulk density, there was a positive relationship with the fines content. And, finally, the fixed carbon content presented a positive relation with ash content. The effect of the positions (length, height and width) of the charcoal stock was only observed for the RAC 700 furnace. The use of the IDW interpolation in conjunction with the analysis of main components and machine learning made it possible, through thematic maps, the realization of inferences about the quality of charcoal in different industrial stocks. It is believed that, for the management of a production unit, such observations allow the identification of problems throughout the production process, enabling them to be solved before they cause great economic losses, improving the quality control of the company.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em escala industrial, sendo responsável por aproximadamente 14% da produção mundial (FAO, 2018). Os principais consumidores deste insumo são os setores de ferro-gusa, liga de ferro, usos residenciais (de cozinha residencial e de aquecimento), entre outros setores industriais (EPE, 2017).

Quando utilizado na forma de termorredutor, o carvão vegetal tem um papel fundamental nos altos-fornos, pois reduz o minério de ferro a partir do carbono, fornece energia para o sistema e atua como estrutura de sustentação da carga de minério. Além disso, é o principal responsável pela permeabilidade do alto-forno, uma vez que pode ocupar cerca de 80% do volume da carga. Assim, para desempenhar todas essas funções, é fundamental que o carvão possua propriedades adequadas para otimizar a produtividade dos altos fornos e a qualidade do produto final (BARROSO, 2007).

As propriedades do carvão vegetal, de modo geral, apresentam alta variabilidade, devido a diversos fatores tais como qualidade da matéria-prima de origem, o processo de carbonização e as atividades relacionados a sua movimentação, como a carga e descarga, por exemplo. Sendo que, uma maior variabilidade do produto pode dificultar seu controle de qualidade.

Quando realizado de forma inadequada, o controle de qualidade das propriedades do carvão pode resultar em um fornecimento de resultados não fidedignos da população, conflitos com o consumidor final e prejuízos econômicos ao produtor (SAMOHYL, 2009). Portanto, são necessários mecanismos de acompanhamento das propriedades do carvão vegetal, de forma a garantir o fornecimento de informações confiáveis a respeito do produto e a identificação de possíveis problemas na rotina de produção e uma das ferramentas fundamentais do controle de qualidade das propriedades do carvão vegetal é a amostragem do produto.

A amostragem consiste na retirada de uma porção do carvão vegetal que seja representativa da população (estoque). O método mais utilizado, atualmente, para a amostragem de carvão vegetal nas empresas do setor é a norma ABNT NBR 6923 (1981). Segundo esta norma, a amostragem deve ser efetuada durante todo o processo formação do estoque retirando 25 unidades amostrais. Tais unidades devem contemplar um total 200 litros de carvão vegetal amostrado.

Os crescentes investimentos das empresas do setor de carvão vegetal em fornos de maiores dimensões resultaram em um aumento do volume de carvão produzido a cada

ciclo de carbonização. No entanto, o controle do processo foi dificultado, uma vez que a o monitoramento da distribuição dos gases, taxa de aquecimento e a temperatura ao longo do forno é mais complexo nestes tipos de fornos, o que pode refletir na variabilidade do carvão vegetal estocado.

Neste sentido, é natural que se manifestem incertezas quanto a metodologia ABNT NBR 6923, uma vez que esta norma não faz distinção do tamanho de forno. Além disto, outra grande limitação da mesma é a necessidade da presença de pessoas trabalhando próximas ao maquinário durante a de descarga do forno. A grande potência das máquinas utilizadas atualmente, aliada a baixa visibilidade por parte do condutor, pode causar graves acidentes durante a operação de amostragem.

Neste contexto, percebe-se a necessidade de estudos que contribuam para a elucidação de questões relacionadas amostragem do carvão vegetal, principalmente nos estoques industriais devido ao grande volume de carvão, de modo a compreender a população em estudo. O entendimento da distribuição espacial das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais, por meio de métodos geoespaciais, pode propiciar a constatação de padrões de distribuições, o que auxiliará na formação de procedimentos para coleta de informações do produto.

A aplicação de técnicas geoespaciais é expressiva no setor agrícola e florestal, com presença nas áreas relacionadas ao estudo de atributos do solo, fitopatologia, fitotecnia, dados climáticos, inventário florestal, inventário de biomassa, entre outras (BOKEN *et al.*, 2004; SOOHOO *et al.*, 2016; DESAVATHU *et al.*, 2017). Porém, não há indícios na literatura de estudos que utilizem esta técnica para avaliação das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais.

Visando contribuir para melhorias do controle de qualidade do carvão vegetal, buscou-se, neste trabalho, estudar a distribuição espacial das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Caracterizar a distribuição espacial das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais visando controle de qualidade.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar as propriedades químicas e físicas do carvão vegetal em estoques industriais provenientes de fornos com diferentes dimensões.
- Descrever as propriedades do carvão vegetal por meio de medidas de estatística descritivas.
- Correlacionar a distribuição espacial entre as propriedades do carvão vegetal em estoques industriais provenientes de fornos com diferentes dimensões.
- Avaliar o efeito da posição (comprimento, altura e largura) do estoque nas propriedades do carvão vegetal, para os fornos de diferentes dimensões.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Produção de carvão vegetal no Brasil

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal, representando em 2016, 14% da produção mundial, seguido por Nigéria e Etiópia ambos com 8%, Índia com 5% e República Democrática do Congo com 4% (FAO, 2018). Do total produzido por estes países, mais de 98% é voltado para abastecimento de seus respectivos mercados internos.

No ano de 2016, o Brasil produziu 5,5 milhões de toneladas de carvão vegetal para abastecimento a produção de 5,7 milhões de toneladas de ferro-gusa, 1,8 milhões de toneladas de fundidos de ferro e 0,3 milhões de toneladas de ferroligas (IBGE, 2017; MME, 2017).

No que se refere ao setor de ferro-gusa, as usinas integradas e os produtores independentes são as duas principais rotas de produção de ferro-gusa utilizando o carvão vegetal como termorredutor. Os produtores integrados, no ano de 2017, foram responsáveis por 39% da produção de ferro-gusa utilizando carvão vegetal, enquanto que os produtores independentes representaram 61% desta produção (SINDIFER, 2018).

Em relação aos estados e regiões brasileiras de maior representatividade na produção de ferro-gusa, Minas Gerais é o estado de maior produção, responsável por cerca de 72,6%, seguido da região de Carajás (14,5%), e o estado do Espírito Santo (6,1%) e Mato Grosso do Sul (3,8%) (SINDIFER, 2018).

No Brasil, a produção de carvão vegetal é realizada, em sua maioria, por pequenos e médios produtores, representando 70% da produção nacional. Tal produção é ainda caracterizada por ser um modelo artesanal e pulverizado entre seus produtores. Os fornos utilizados são de alvenaria, de pequena capacidade produtiva, baixa tecnologia e controle de processo.

A produção de carvão vegetal realizada pelas grandes empresas de ferro-gusa e aço, por sua vez, representa 30% da produção de carvão produzido. De forma geral, tais empresas são detentoras de um modelo de produção mecanizado, realizado em praças de carbonização estruturadas para atender uma demanda industrial, utilizando predominantemente, fornos de alvenaria retangulares de grande capacidade produtiva com um grau tecnológico superior aos do pequeno e médio produtor.

Em relação a matéria-prima utilizada, em 2016, 84,4% do carvão vegetal produzido foi proveniente das florestas plantadas. A constante diminuição da utilização das florestas

nativas na produção de carvão vegetal é um aspecto positivo para a sustentabilidade do setor, uma vez que esta prática diminui a pressão sobre as florestas plantadas (IBA, 2017).

3.2. Distribuição espacial

Os métodos de interpolação permitem que valores das propriedades localizadas em pontos não conhecidos sejam estimados através de pontos onde tem-se o valor conhecido. A interpolação baseia-se no princípio de autocorrelação espacial, em que são assumidos que os pontos mais próximos são mais similares que aquelas observações mais distantes (ARUN, 2013). Deste modo, uma conversão das observações espaciais pontuais em uma malha contínua é realizada, o que reproduz um padrão espacial do objeto em estudo, formando assim o mapa temático (HUANG *et al.*, 2011).

Um das formas mais comuns de classificação dos métodos de interpolação, é a segregação em duas classes: determinísticos e probabilísticos. Os métodos determinísticos levam em consideração apenas as formulações matemáticas, em que somente as relações baseadas na distância são levadas em consideração. Portanto esta abordagem não pressupõe a existência de distribuição de probabilidade associada aos valores dos atributos, ou seja, não são calculadas as incertezas das estimativas. Já os métodos probabilísticos, como o próprio nome sugere, utiliza a formulação matemática em conjunto com ferramentas estatísticas para investigar a autocorrelação espacial da malha de pontos. Estes métodos pressupõem que cada amostra está associada a uma variável aleatória, com uma certa distribuição de probabilidade presente (MIRANDA, 2017).

O Inverso do quadrado da distância (IDW) é um dos métodos determinístico de interpolação mais amplamente utilizado. Esta técnica tem como vantagem a simplicidade de implementação, robustez e necessidade de poucos inputs, quando comparado a outros métodos. Além de não requerer qualquer pressuposição para os dados, o IDW pode ser capaz de realizar um bom ajuste para o conjunto de informações. De forma geral, apresenta-se como um método consolidado e com performance comprovada (BOKEN *et al.*, 2004; BELOTTI *et al.*, 2010; ABOYEJI & EIGBOKHAN *et al.*, 2016; TAHA *et al.*, 2017).

3.3. Análise de componentes principais

A combinação de técnicas geoespaciais e técnicas multivariadas é recorrente para o estudo da distribuição espacial dos dados (HOU *et al.*, 2017). Sendo a análise de

componentes principal (ACP), uma das abordagens multivariadas mais utilizadas em estudos geoespaciais.

A ACP consiste na transformação linear de um conjunto de dados, de mesma dimensão, denominado componentes principais. As componentes principais apresentam algumas propriedades importantes: Cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis de estudo; são ortogonais, ou seja, independentes entre si; são estimadas com o propósito de reter o máximo de informações, no que diz respeito à variância dos dados, possível (JOHNSON e WICHERN, 2007).

A ACP destaca-se pela eficiência de indicar relações entre os atributos analisados, de forma a auxiliar na interpretação e confirmação de padrões nos mapas temáticos. Um dos objetivos da análise de componentes principais (ACP) é a interpretação de uma base de dados, através da explicação da estrutura da variância de um grupo de variáveis. Através da PCA é possível indicar relações entre as variáveis não observadas por outras técnicas, permitindo elucidar relações não usualmente obtidas. (JOHNSON e WICHERN, 2007; HOU *et al.*, 2017).

3.4. Aprendizagem de máquina

A aprendizagem de máquina por sua vez, é uma técnica multivariada que utiliza algoritmos complexos para reconhecer padrões em informações, e posteriormente realizar processos de predição ou classificação dos dados (DEO, 2015). Segundo Li *et al.* (2001), quando utilizada em conjunto com análises geoespaciais, essa técnica pode prever a contribuição espacial das variáveis de estudo.

Existem diversos tipos de aprendizagem de máquina, sendo que, um dos mais utilizados é o *random forest*. O *random forest* é uma classe de algoritmos utilizado para resolver problemas de classificação e regressão (SCORNET, 2016). De maneira geral, é uma abordagem de simples compreensão, interpretação, visualização e podem ser usados dados categóricos ou números.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local de estudo

O estudo foi realizado em uma Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC) pertencente a empresa Aperam BioEnergia, localizada no município de Veredinha, Minas Gerais, Brasil.

4.2. Madeira

Para a realização das carbonizações foram utilizadas madeira com casca de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 7 anos de idade, com diâmetro variando de 12 a 28 cm, umidade de 35% (b.s), comprimento de aproximado de 3 m, densidade média de 520 kg/m³, provenientes de plantio comercial, com espaçamento 3x3, localizados no município de Capelinha, MG.

4.3. Fornos

As carbonizações foram realizadas em dois tamanhos distintos de fornos retangulares construídos em alvenaria de tijolo cerâmicos e estrutura de concreto armado, denominados pela empresa de RAC 700 e RAC 220.

O forno RAC 700 tem dimensões de 26,5 m de comprimento, 8,0 metros de largura e 7,0 m de altura e volume útil de madeira enfiada de aproximadamente 500 m³. Este tamanho de forno possui três câmaras de admissão de ar com dimensões de 25 cm x 25 cm, ligadas a oito entradas de ar no interior do forno, de diâmetro de 25 cm, cada.

Já o forno RAC 220, tem dimensões de 26,5 m de comprimento, 4,0 m de largura, 4,87 de altura e volume útil de aproximadamente 150 m³. O RAC 220, possui quatro câmaras de admissão de ar com dimensões de 25 cm x 25 cm, sendo que as câmaras são ligadas a quatro entradas de ar no interior do forno, de diâmetro de 25 cm.

4.4. Produção de carvão vegetal

O processo de produção do carvão vegetal iniciou com a chegada da madeira na Unidade Produtora de Carvão vegetal (UPC) (Figura 1), a qual foi depositada em estoques, comumente denominados boxes, localizados ao lado do respectivo forno onde foi realizada a carbonização. O fluxograma do processo de carbonização está apresentado na Figura 2.

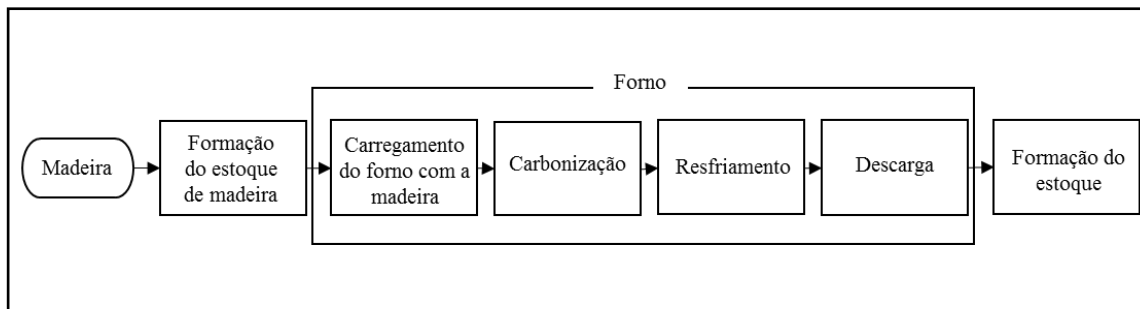


Figura 1 - Fluxograma de produção de carvão vegetal.

Antes do carregamento da madeira para interior do forno, realizou-se a limpeza dos controladores de ar (câmaras) e da chaminé. O carregamento do forno foi realizado por meio de um implemento (garra) acoplado a um trator agrícola. Após o carregamento, fechou-se a porta do forno utilizando macaco hidráulico. Ressalta-se que a madeira no interior do forno foi depositada na horizontal.

A primeira etapa da carbonização consistiu na ignição do forno, que é fornecimento inicial de energia para o processo. A ignição foi feita nas câmaras de admissão de ar dos fornos, utilizando atijo (porção de carvão vegetal residual não carbonizada) em seu interior.

Para controle do processo de carbonização foram realizadas medições da temperatura nas tampas da chaminé e também nas portas (Parte superior, central e inferior), com auxílio de um pirômetro, em intervalo de tempo de duas horas, durante todo o processo de carbonização, que teve duração de aproximadamente quatro a cinco dias para ambos tamanhos de forno.

Ao final da carbonização, iniciou-se o resfriamento do carvão, que consistiu na vedação das câmaras de admissão de oxigênio do forno. O resfriamento do forno do RAC 220 ocorreu em média de 8 dias, enquanto que para o forno do RAC 700 esse tempo foi maior, em média 12 dias.

Após o resfriamento do carvão vegetal, procedeu-se à abertura da porta do forno. Assim, a retirada do carvão do interior do forno foi realizada por um implemento (concha) acoplado a um trator agrícola. A descarga foi feita de forma que o estoque de carvão fosse depositado em camadas em camadas, ou seja, as primeiras conchadas do trator correspondeu a porção basal do estoque e as conchadas finais formaram o topo do estoque.

Ao final do descarregamento, o estoque de carvão vegetal foi novamente rearranjado com auxílio de um trator, seguindo um procedimento operacional da empresa, com objetivo de deixar o estoque na forma aproximada de um prisma triangular. Tal característica de forma do estoque está relacionada com facilidade operacional.

Para cada ciclo completo de carbonização foi gerado um estoque, totalizando assim, no final, três estoques para cada tipo de forno. As dimensões médias dos estoques formados para os fornos RAC 700 e RAC 220 estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões médias do estoque de carvão vegetal por tipo de forno

Dimensões (m)	Forno	
	RAC 700	RAC 220
Comprimento (x)	30	12
Altura (y)	5	5
Largura (z)	8	6

4.5. Amostragem do carvão vegetal

Para a coleta do carvão vegetal nos estoques, utilizou-se um Implemento Coletor de carvão vegetal, desenvolvido pela empresa Aperam BioEnergia. O Implemento Coletor foi construído com aço carbono/ASTM A-36 com 6,5 metros de comprimento e 45 centímetros de diâmetro interno, e o volume interno do equipamento é de aproximadamente 0,2 m³.

O implemento foi acoplado ao sistema hidráulico de um trator agrícola, sendo capaz de coletar amostras de carvão ao longo de toda a largura (z) do estoque (Figura 2). Ao ser inserido nos pontos estabelecido de coleta no estoque, por meio de um comando hidráulico a parte superior do implemento abre, permitindo a entrada de carvão em toda sua extensão.

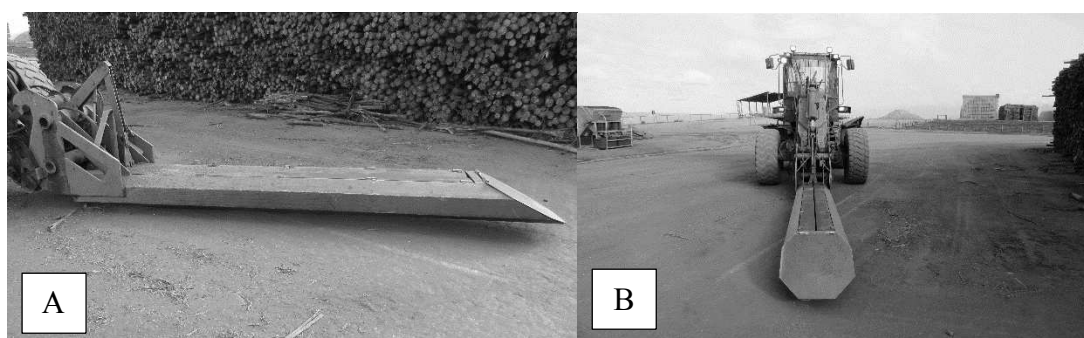


Figura 2 - Vista lateral (A) e vista frontal (B) frontal do Implemento Coletor de carvão vegetal.

A amostragem do carvão vegetal foi realizada de forma sistemática, em que as unidades amostrais foram selecionadas por meio de esquema de pontos amostrais preestabelecido. O posicionamento dos pontos amostrais do carvão vegetal para determinação das suas propriedades, no forno RAC 700, foi realizada a partir de 25 unidades amostrais ao longo da estrutura do estoque, sendo que cada unidade amostral apresentou volume médio de aproximadamente 0,04 m³ de carvão vegetal. Na Figura 3 e na Tabela 2 estão representados os pontos de amostragem ao longo do estoque de carvão vegetal, sendo x, y e z, o comprimento, altura e largura do estoque, respectivamente.

Tabela 2 - Pontos de coleta das unidades amostrais para o estoque proveniente do forno RAC 700

Unidades amostrais	Localização no estoque	Comprimento (m)	Altura (m)	Largura (m)
		x	y	z
1	Base	5	0,5	0,8
2	Base	5	0,5	3,2
3	Base	5	0,5	7,2
4	Topo	5	2,5	0,8
5	Topo	5	2,5	3,2
6	Base	10	0,5	0,8
7	Base	10	0,5	3,2
8	Base	10	0,5	7,2
9	Topo	10	2,5	0,8
10	Topo	10	2,5	3,2
11	Base	15	0,5	0,8
12	Base	15	0,5	3,2
13	Base	15	0,5	7,2
14	Topo	15	2,5	0,8
15	Topo	15	2,5	3,2
16	Base	20	0,5	0,8
17	Base	20	0,5	3,2
18	Base	20	0,5	7,2
19	Topo	20	2,5	0,8
20	Topo	20	2,5	3,2
21	Base	25	0,5	0,8
22	Base	25	0,5	3,2
23	Base	25	0,5	7,2
24	Topo	25	2,5	0,8
25	Topo	25	2,5	3,2

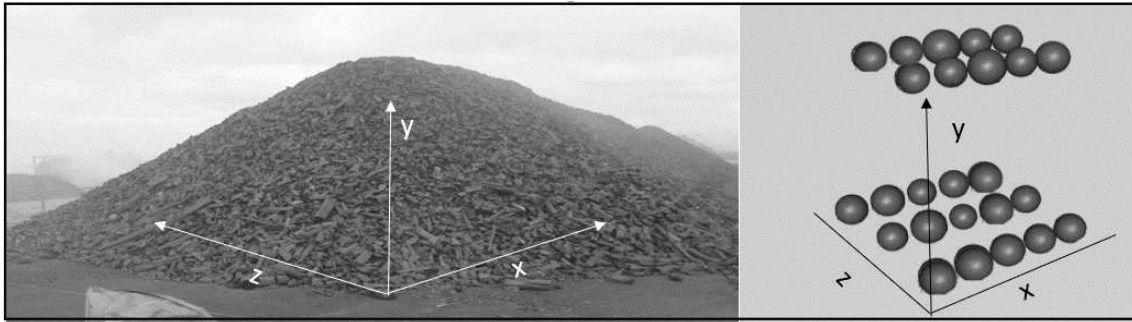


Figura 3 - Esquema ilustrativo de unidades amostrais no estoque do forno RAC 700.

A amostragem e a coleta do carvão vegetal, no forno RAC 220, por sua vez, foi realizada a partir de 15 unidades amostrais ao longo da estrutura do estoque, cada unidade amostral tinha volume médio de aproximadamente $0,04\text{m}^3$ de carvão vegetal.

A escolha do número de unidades amostrais, tanto para o forno RAC 700, quanto para o forno RAC 220, foram baseadas na norma ABNT NBR 6923 (1981) e no tamanho do estoque do carvão, como referência para a escolha deste número. Na Figura 4 e Tabela 3 estão representados os pontos de amostragem ao longo do estoque de carvão vegetal.

Tabela 3 - Pontos de coleta das unidades amostrais para o estoque proveniente do forno RAC 220

Unidade amostrais	Localização no estoque	Comprimento (m)	Altura (m)	Largura (m)
		x	y	z
1	Base	1.5	0.5	0.8
2	Base	1.5	0.5	2.4
3	Base	1.5	0.5	5.7
4	Topo	1.5	2.5	0.8
5	Topo	1.5	2.5	2.2
6	Base	6.5	0.5	0.8
7	Base	6.5	0.5	2.4
8	Base	6.5	0.5	5.7
9	Topo	6.5	2.5	0.8
10	Topo	6.5	2.5	2.2
11	Base	11.5	0.5	0.8
12	Base	11.5	0.5	2.4
13	Base	11.5	0.5	5.7
14	Topo	11.5	2.5	0.8
15	Topo	11.5	2.5	2.2



Figura 4 - Esquema ilustrativo de unidades amostrais no estoque do forno RAC 220.

A coleta de unidades amostrais na parte superior e inferior, para ambos os tipos de estoques (provenientes do forno RAC 700 e RAC 220), foi realizada seguindo o mesmo procedimento. Na parte superior do estoque, o implemento coletor coletou duas unidades amostrais a cada vez que o mesmo era introduzido no estoque. Já para a parte inferior do estoque, o implemento coletou três unidades amostrais. O número de coletas na parte superior do estoque foi menor que o número de coletas na parte inferior devido a largura do estoque na parte superior se apresentar menor.

Após a coleta das unidades amostrais de cada estoque, para cada tamanho de forno, as amostras de carvão vegetal foram colocadas em recipientes fechados e direcionadas para o laboratório da empresa, localizado na Unidade Produtora de Carvão, situada no município de Veredinha.

4.6. Propriedades do carvão vegetal

A classificação granulométrica do carvão vegetal, para ambos os tamanhos de estoques, foi realizada, em duplicata, de acordo com a norma NBR 7402 (ABNT, 1982) adaptada. Primeiramente, toda a massa da amostra de carvão foi colocada em um conjunto de peneiras vibratórias. Foram utilizadas 12 peneiras com malhas de 63,5; 50,8; 44,2; 38,1; 31,7; 25,4; 19,05; 15,9; 12,7; 9,52; 6,25; e 4,76 milímetros. Essa ficou em agitação por 5 minutos, sendo o carvão retido em cada peneira recolhido e pesado.

O teor de finos do carvão foi calculado por meio da divisão da massa de carvão que passou pela peneira de 9,52 mm pela massa total da amostra de carvão. O teor de finos se refere à fração do carvão vegetal que, para a empresa de estudo, é considerado resíduo, não utilizado como termorreduzidor nos alto-fornos.

A granulometria média do carvão vegetal foi calculada segundo a fórmula (1):

$$TM = (B(a - c) + C(b - d) + \dots + L(k - m) + 100 \times 1) \times 0,005 \quad (1)$$

onde:

TM = Granulometria média do carvão vegetal (mm)

a, b, c, d, ...k, l, m = abertura das malhas (mm)

A, B, C, D, ...K, L, M = porcentagens acumuladas (%)

A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada de acordo com a norma NBR 6922 (ABNT, 1981) adaptada, reduzindo-se o volume do recipiente para 0,021 m³. Para determinação do teor de carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas, foi utilizado o carvão vegetal proveniente do ensaio de classificação granulométrica de 19,05 mm, que após moído, selecionou-se aquela fração que ficou retida entre as peneiras de 40 e 60mesh. Posteriormente, tais propriedades foram determinadas de acordo com a ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), em duplicatas, calculando o carbono fixo calculado por diferença.

4.7. Análise dos dados

4.7.1. Análise descritiva

Para a análise estatística descritiva, os valores das propriedades do carvão foram separados de acordo com a dimensão do forno. Para isto, calculou-se as medidas de tendência central (média aritmética e mediana) e as medidas de dispersão (amplitude, desvio padrão e coeficiente de variação), com auxílio do *software* R versão 3.4.3 (R Core Team, 2017).

Para a interpretação do coeficiente de variação, utilizou-se a classificação de Warrick e Nielsen (1980), que classifica como variabilidade baixa valores menores de 12 %; média, entre 12 e 60 %; e alta, maiores de 60 %.

Além da análise descritiva, realizou-se a verificação da normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade de variâncias por meio do teste Levene, ambos executados com auxílio do *software* R versão 3.4.3 (R Core Team, 2017), por meio do pacote *stats*.

4.7.2. Relação entre as propriedades do carvão vegetal nos estoques dos fornos

A análise geoespacial juntamente com a análise de componentes principais foi realizada com o objetivo de avaliar as relações entre as propriedades do carvão vegetal, sendo feitas de forma individualizada para cada estoque, distinguindo-se as dimensões do

forno. É importante ressaltar que a combinação de técnicas geoespaciais com técnicas multivariadas é recorrente para o estudo da distribuição espacial dos dados.

A distribuição espacial para cada propriedade do carvão, ao longo do estoque, foi modelada utilizando o processo de interpolação Inverso do Quadrado da Distância (IDW). A função de interpolação IDW calcula os pontos desconhecidos a partir da média ponderada dos pontos amostrados. A distância entre o ponto estimado e os pontos amostrados é utilizada como fator de ponderação dando o maior valor aos pontos mais próximos do ponto estimado (DIXON e UDDAMERI, 2016). A equação geral do IDW é dada por (2):

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^s Z_i \left(\frac{1}{d_i^2}\right)}{\sum_{i=1}^s \left(\frac{1}{d_i^2}\right)} \quad (2)$$

onde:

Z_0 = Valor estimado da propriedade no ponto 0;

Z_i = Valor da propriedade no ponto conhecido;

d_i = distância entre o ponto i e o ponto 0;

s = número de pontos conhecidos usados na estimativa.

A interpolação IDW foi realizada com o auxílio do *software* R versão 3.4.3 (R Core Team, 2017). Para a aplicação dessa interpolação utilizou-se o *Package* ‘gstat’ (PEBESMA, 2004).

A análise de componentes principais, por sua vez, foi realizada com objetivo de auxiliar na interpretação dos mapas temáticos obtidos a partir da interpolação das propriedades do carvão vegetal. Na Figura 5 está apresentado o esquema geral dos procedimentos de utilização da análise de componentes principais:

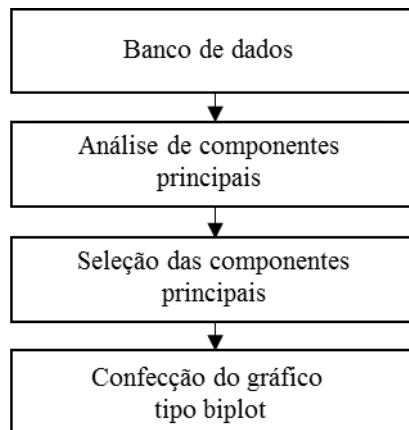


Figura 5 - Esquema de implementação da análise de componentes principais para os estoques, para ambos os tamanhos dos fornos.

A análise de componentes principais foi realizada por meio do o *software* R versão 3.4.3 (R Core Team, 2017). Selecionou-se aquelas componentes principais que apresentaram autovalor maior que 1 e que explicaram pelo menos 20% da variabilidade das amostras de carvão vegetal (ANDREWS *et al.*, 2002; LOBATO, *et al.*, 2015; ABOYEJI e EIGBOKHAN, 2016).

Após a seleção das componentes principais, confeccionou os gráficos do tipo biplot, os quais foram utilizados para facilitar a identificação das relações entre as propriedades do carvão vegetal, além de permitir a visualização da dispersão da matriz de dados (GABRIEL, 1971).

4.7.3. Efeito da posição do estoque nas propriedades do carvão vegetal

A análise geoespacial utilizada em conjunto a técnica de aprendizagem de máquinas foram utilizadas com o intuito de avaliar o efeito das posições (comprimento, altura e largura do estoque) em cada propriedade do carvão vegetal, de modo a confirmar possíveis tendências de distribuição espacial. As análises foram realizadas de forma separada para cada estoque, distinguindo o tamanho do forno.

A predição foi realizada no software R versão 3.4.3 (R Core Team, 2017) por meio do *Package* “randomforest” (LIAN e WIENER, 2002).

Na Figura 6 está apresentado o esquema geral dos procedimentos de implementação da técnica de predição *random forest*, para as propriedades do carvão vegetal nos diferentes estoques avaliados.

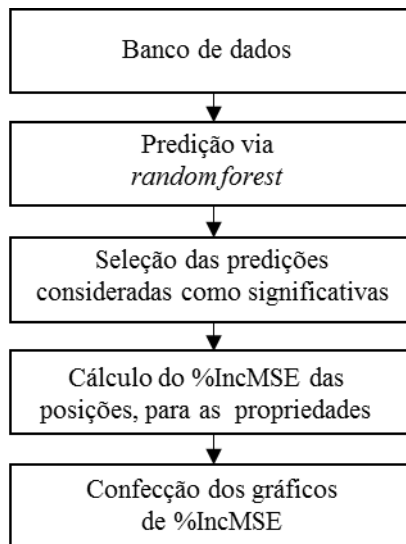


Figura 6 - Esquema de implementação da predição das propriedades do carvão vegetal em função da posição do estoque, por meio da técnica *random forest*.

Primeiramente, implementou-se a técnica de aprendizagem de máquinas, a *random forest* (LIAN e WIENER, 2015), com 500 *decision trees*. Posteriormente, foi realizada a seleção das predições, no qual assumiu-se como significativas e selecionadas, aquelas predições que explicaram, pelo menos, 20% da variabilidade das amostras do estoque para uma cada propriedade do carvão vegetal.

Após selecionadas as propriedades do carvão vegetal que tiveram efeito significativo da posição no estoque, foi mensurado o grau de importância individual de cada posição (comprimento, altura e largura) na explicação dos dados da propriedade (%IncME). A partir dos valores de %IncME das posições do estoque para cada propriedade do carvão, confeccionou-se um gráfico para melhor compreensão dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise descritiva dos dados

A análise descritiva das propriedades do carvão vegetal dos estoques provenientes dos fornos RAC 700 e RAC 220 estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do carvão vegetal de acordo com o tamanho de forno

Forno	Parâmetros	Propriedades do carvão vegetal					
		GM (mm)	TF (%)	DG (kg/cm ³)	CF (%)	MV (%)	CZ (%)
RAC 700	n	75	75	75	75	75	75
	Média	33,75	20,75	205,58	73,29	25,21	1,50
	Mediana	31,62	20,94	198,40	73,10	25,27	1,47
	Mínimo	24,49	2,47	158,79	65,78	18,20	0,87
	Máximo	52,25	33,24	321,90	80,08	32,63	2,65
	CV (%)	17,51	41,54	18,04	4,57	7,69	25,33
RAC 220	n	45	45	45	45	45	45
	Média	31,98	23,79	180,69	71,10	27,67	1,23
	Mediana	31,35	25,85	179,99	71,52	27,12	1,16
	Mínimo	22,70	5,46	146,40	64,46	24,02	0,76
	Máximo	44,95	38,48	259,38	74,49	34,70	2,00
	CV (%)	17,98	38,92	12,32	3,33	9,00	24,39

Legenda: n = número de unidades amostrais; GM = Granulometria média; TF = Teor de finos; DG = Densidade a granel; CF = Carbono fixo; MV = Materiais voláteis; CZ = Cinzas.

Para os valores de granulometria média, foi verificado um coeficiente de variação de 17,51% e 17,98 %, para os fornos RAC 700 e RAC 220, respectivamente. De acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), estes valores de coeficiente de variação são considerados médios, e podem ser atribuídos as quebras ocorridas no carvão vegetal devido a sua natureza friável, que altera a sua granulometria quando ocorre movimentação, seja pela pelas operações de descarga dos fornos ou formação do estoque.

A granulometria média é um parâmetro do carvão vegetal de grande relevância para a produção de ferro-gusa, pois no alto-forno é necessário que os gases ascendentes percolem a carga de minério, de forma uniforme. Logo, uma adequada granulometria é essencial para conferir permeabilidade a carga no alto-forno, tornando-se uma das principais variáveis de controle para melhorar o desempenho do sistema. Granulometrias baixas acarretam cargas com baixa permeabilidade, prejudicando a eficiência das reações de redução de minério de ferro.

Os teores de finos apresentaram uma amplitude de variação de 2,47 a 33,24% para os estoques RAC 700 e de 5,46 a 38,42% para os RAC 220. Quanto ao coeficiente de variação, ambos os tamanhos de fornos apresentaram um coeficiente de variação considerado como médio, com valores de 41,54 e 38,92%, para o RAC 700 e RAC 220, respectivamente. Assim como para a granulometria média, os valores do teor de finos observados podem ser atribuídos a natureza friável do carvão vegetal. Logo, quanto maior

a movimentação do carvão vegetal, maiores serão as quebras e, conseqüentemente, maior será o teor de finos.

O teor de finos refere-se à fração residual do carvão vegetal inferior a 9,52 mm, portanto, maiores percentuais desta propriedade implicam em um maior custo final da tonelada do carvão vegetal. Ressalta-se que em algumas empresas são utilizadas peneiras de malha de 8 mm para classificar o teor de finos, visando o melhor aproveitamento do carvão vegetal para produção de ferro-gusa. A escolha granulometria do carvão que irá se classificada como finos, depende das necessidades de cada empresa. Cada cliente/consumidor final pode apresentar específicas demanda quanto a faixa granulométrica determinada como teor de finos, baseadas principalmente na característica do alto-forno.

Observa-se que nos estoques provenientes dos fornos tipo RAC 700, a densidade a granel apresentou um coeficiente de variação de 18,04%, já para os RAC 220, o coeficiente de variação foi de 12,32%, sendo ambos coeficientes de variação classificados como médio.

Cabe destacar que o carvão vegetal com menores granulometrias acarreta numa maior ocupação dos espaços vazios entre as peças de carvão, podendo influenciar diretamente sua densidade a granel.

O teor de carbono fixo do estoque RAC 700 variou entre 65,78 e 80,08%, e para o RAC 220, apresentou uma variação de 64,46 a 74,49%. Em relação ao coeficiente de variação, ambos os tamanhos de fornos apresentaram baixo coeficiente de variação, com valores entre 4,57% e 3,33%, respectivamente. O teor de carbono fixo está relacionado diretamente ao processo de carbonização, principalmente no que tange tempo e temperatura de degradação da madeira. Considerado que foi utilizado o mesmo controle de processo para todas as carbonizações, era esperado um baixo coeficiente de variação dos valores observados.

O teor de carbono fixo reflete na utilização volumétrica do alto-forno. Logo, maiores teores de carbono fixo irão resultar em uma menor ocupação volumétrica carvão. Assim, uma quantidade maior de espaço restará para o minério a ser reduzido. Contudo, altos teores de carbono fixo estão associados a uma baixa resistência mecânica do carvão, o que não é indicado para o uso siderúrgico (FREDERICO, 2009). Logo é importante que haja uma ponderação entre essas propriedades para que o processo de redução do minério de ferro ocorra de forma otimizada.

A estabilidade de chama e velocidade de queima do carvão vegetal é determinada pelo teor de materiais voláteis, promovendo um aumento da permeabilidade de carga no alto forno (SANTOS, 2010). Segundo o autor, são desejáveis teores materiais voláteis entre 20% e 25%, para o uso siderúrgico do carvão vegetal, uma vez que esse parâmetro apresenta comportamento inverso ao teor de carbono fixo.

Foi observada um baixo coeficiente de variação no teor de materiais voláteis, para ambos tamanhos de fornos, sendo de 7,69% para o RAC 700 e 9,00% para o RAC 220. Assim como para o teor de carbono fixo, neste estudo, o teor de materiais voláteis, também está principalmente relacionado diretamente com o processo de carbonização. Como o material genético foi o mesmo para todas as carbonizações, em dimensões semelhantes de diâmetro e umidade, atribui-se esta baixa variação a fatores como tempo e temperatura de carbonização.

O teor de cinzas para os estoques RAC 700 e RAC 220 apresentaram uma amplitude de variação de 0,87 a 2,65% e 0,76 a 2,00%, respectivamente, e apresentado coeficientes de variação classificados como médios, com valores de 25,33 e 24,39%. O teor de cinzas do carvão vegetal é proporcional ao teor de cinzas da madeira. Assim, considerando que o teor de cinzas da madeira utilizada para as carbonizações foi inferior que 1%, pode-se atribuir esta variação no teor de cinzas à presença de contaminantes no carvão vegetal, principalmente provenientes do piso do forno e do pátio de estoque. A presença de elevados percentuais de cinzas no carvão vegetal pode causar uma diminuição no seu poder calorífico, desgastes nos alto-fornos, além de prejudicar a qualidade do ferro-gusa, uma vez que podem ocasionar a formação de trincas e fissuras (SANTOS, 2010; PEREIRA *et al.*, 2013)

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados dos testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para as propriedades do carvão vegetal por capacidade do forno.

Tabela 5 - Teste Shapiro-Wilk para verificação da normalidade dos dados e teste de Levenes para análise da homogeneidade de variância

Forno	Teste	GM (mm)	TF (%)	DG (kg/cm ³)	CF (%)	MV (%)	CZ (%)
RAC 700	SW	*	*	*	ns	ns	*
	L	ns	ns	*	*	*	*
RAC 220	SW	ns	*	*	*	*	ns
	L	ns	ns	*	*	*	*

* = p-valor<0,05; ns = não significativo

Legenda: SW = Teste Shapiro-Wilk; L = Leste de Levene; GM = Granulometria média; TF = Teor de finos; DG = Densidade a granel = CF: Carbono fixo = MV = Materiais voláteis; CZ = Cinzas.

De acordo com a Tabela 5, observa-se que as pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias não foram atendidas para todas as propriedades, o que impediu a utilização de ferramentas estatísticas paramétricas convencionais.

Os métodos paramétricos baseiam-se na suposição de que a frequência de distribuição dos dados e dos resíduos de uma população tenham uma distribuição teórica conhecida, a distribuição normal. Caso a distribuição dos dados não atenda tais pressuposições, e são submetidos a testes paramétricos, os resultados obtidos podem conter informações errôneas, não fidedignos ou distorcidas da população de estudo.

Foi observado uma dependência espacial nos dados, devido principalmente ao processo de carbonização, que apresenta variações ao longo do interior do forno, e a descarga do carvão, que é realizada de acordo com um procedimento operacional, favorecendo, portanto, a utilização de uma abordagem geoespacial como análise. As técnicas geoespaciais, de forma geral, não necessitam que os dados apresentem normalidade, homogeneidade de variância e independência espacial, requerendo, apenas, que apresentem uma dependência espacial (GREGO e OLIVEIRA, 2015).

5.2. Relações entre as propriedades do carvão vegetal nos estoques do forno RAC 700

As estimativas de variância explicadas pelas componentes principais dos estoques avaliados e seus respectivos autovalores, para o forno tipo RAC 700, estão apresentados na Tabela 6.

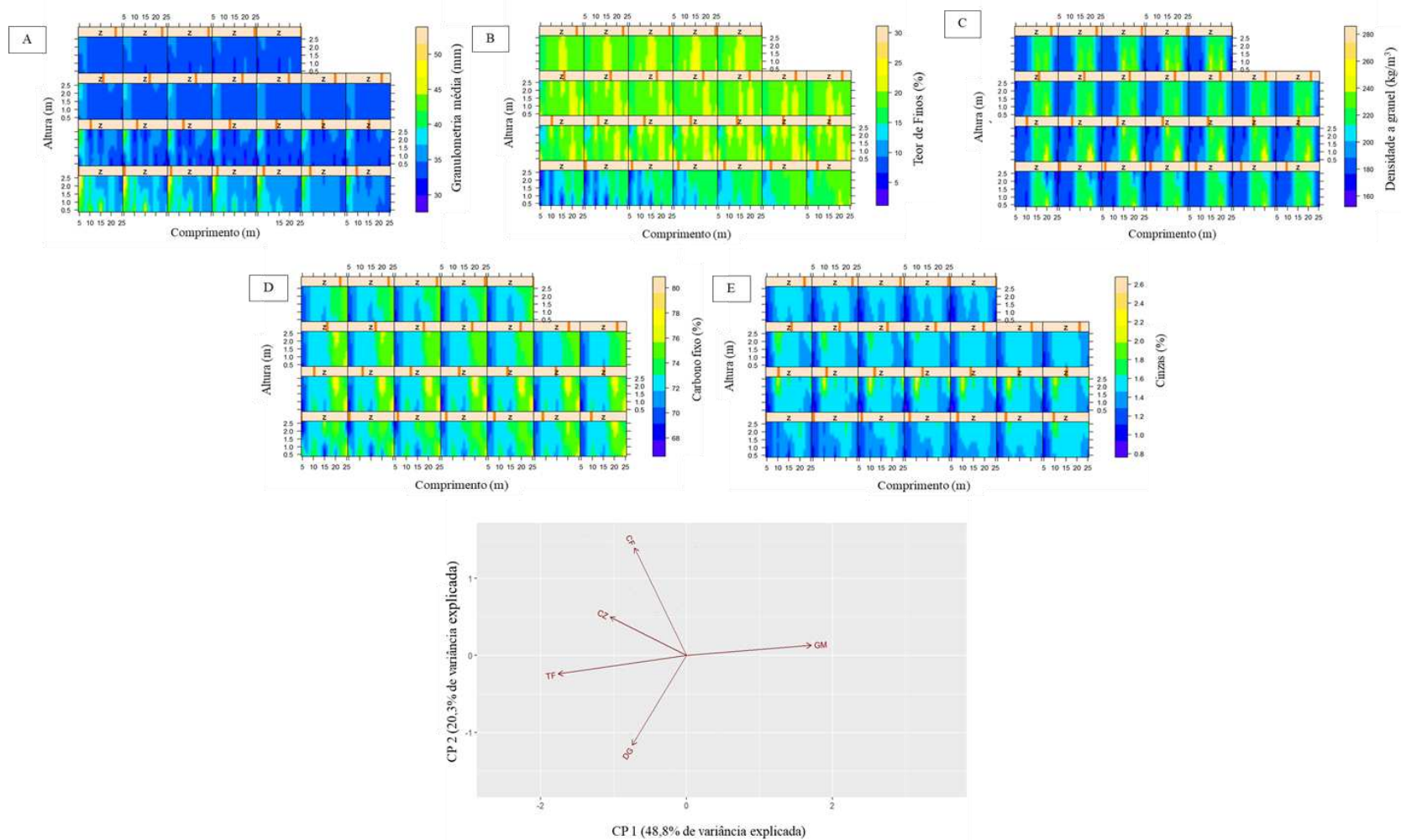
Tabela 6 - Estimativa da variância associada as componentes principais e respectivo autovalor para os estoques do forno tipo RAC 700

Componentes Principais	Variância explicada (%)			Autovalores		
	Estoque 1	Estoque 2	Estoque 3	Estoque 1	Estoque 2	Estoque 3
CP1	45,8*	44,33*	51,0*	2,5*	2,4*	2,6*
CP2	20,3*	23,85*	25,1*	1,0*	1,2*	1,3*
CP3	17,2	18,36	17,3	0,8	0,8	0,8
CP4	15,0	12,2	4,7	0,7	0,6	0,3
CP5	15,6	1,2	2,0	0,2	0,1	0,1

* Componente principal que explica pelo menos 20% da variabilidade do estoque e apresenta autovalores maior que 1.

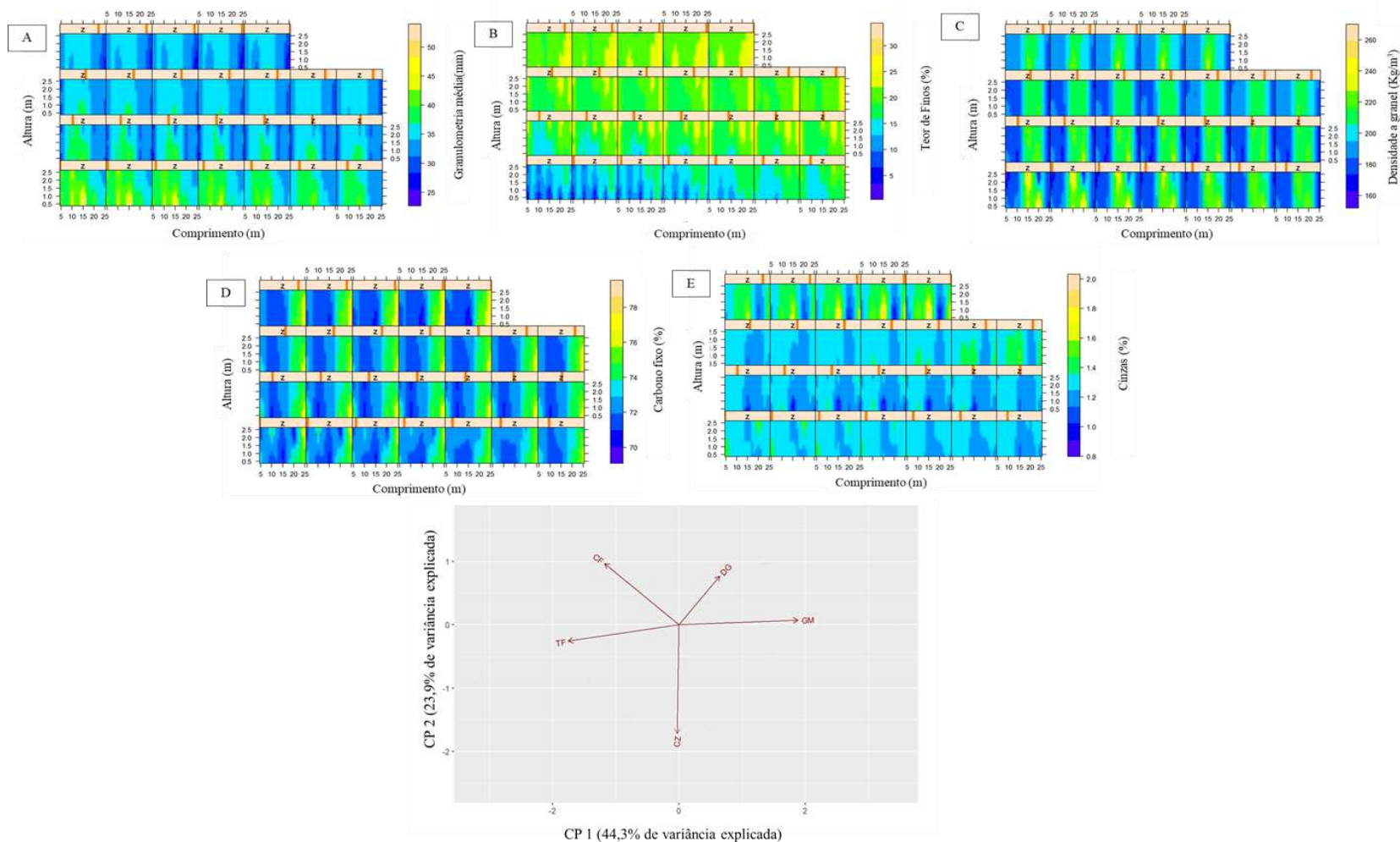
De acordo com critério de seleção utilizado, em que foram escolhidas aquelas Componentes principais que explicaram pelo menos 20% da variabilidade do estoque e apresenta autovalores maior que 1, selecionou-se a Componente Principal 1 (CP1) e Componente Principal 2 (CP2), para todos três estoques avaliados, provenientes do forno RAC 700.

Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentadas a distribuição geospacial das propriedades do carvão vegetal e análise de componentes principais para os estoques do forno RAC 700.



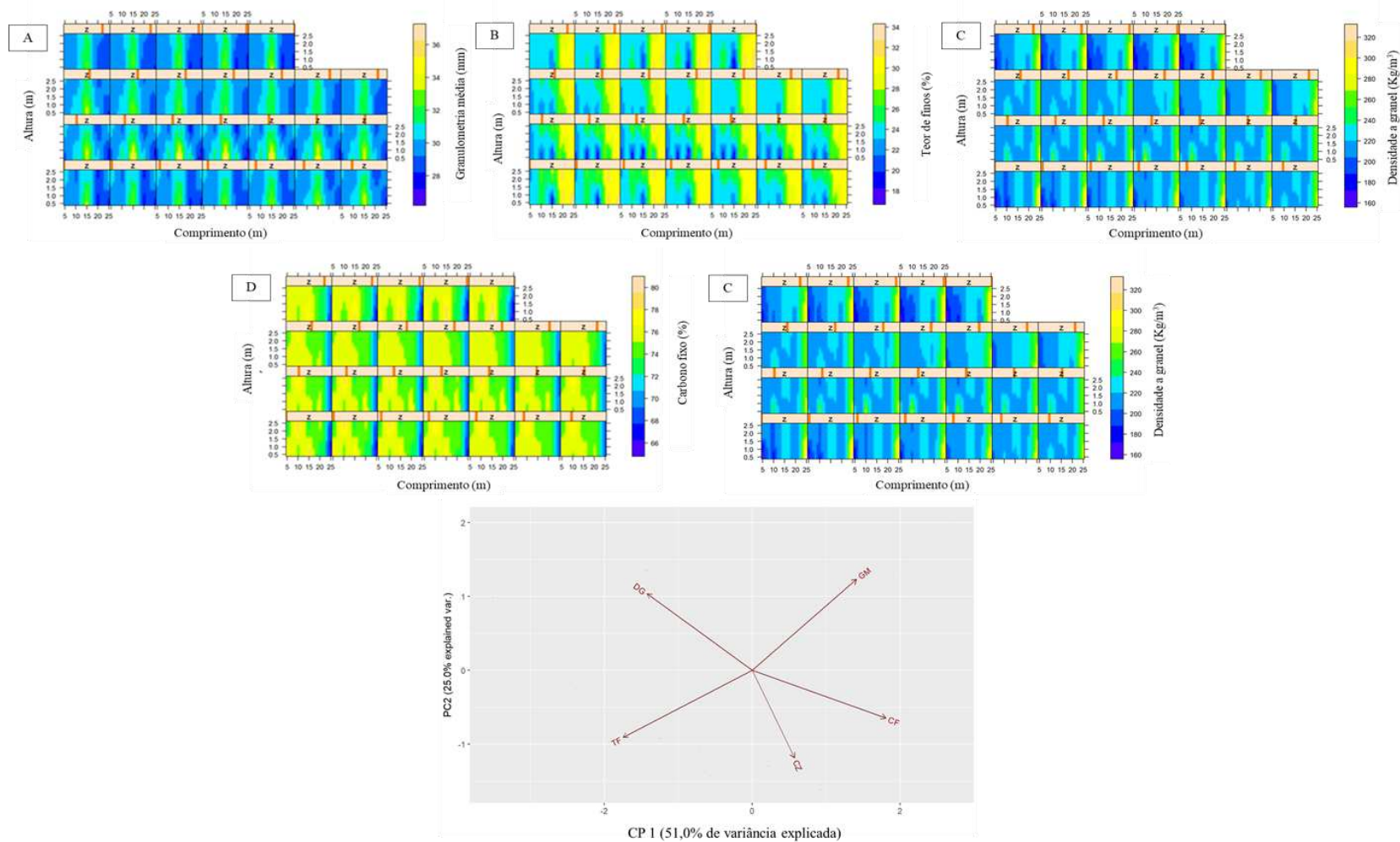
Legenda: GM – granulometria média; TF – teor de finos; DG – densidade a granel; CF – carbono fixo; CZ – cinzas.

Figura 7 - Distribuição espacial da granulometria média (A), teor de finos (B), densidade a granel (C), carbono fixo (D), cinzas (E) e autovetores das propriedades em relação as componentes principais 1 e 2 para o estoque 1 (RAC 700).



Legenda: GM – granulometria média; TF – teor de finos; DG – densidade a granel; CF – carbono fixo; CZ – cinzas.

Figura 8 - Distribuição espacial da granulometria média (A), teor de finos (B), densidade a granel (C), carbono fixo (D), cinzas (E) e autovetores das propriedades em relação as componentes principais 1 e 2 para o estoque 2 (RAC 700).



Legenda: GM – granulometria média; TF – teor de finos; DG – densidade a granel; CF – carbono fixo; CZ – cinzas.

Figura 9 - Distribuição espacial da granulometria média (A), teor de finos (B), densidade a granel (C), carbono fixo (D), cinzas (E) e autovetores das propriedades em relação as componentes principais 1 e 2 para o estoque 3 (RAC 700).

De acordo com os mapas temáticos (Figuras 9, 10 e 11), independente do estoque avaliado, observa-se uma relação inversa entre a granulometria média e o teor de finos, ou seja, as regiões em que são observadas as menores granulometrias médias, são obtidos os maiores percentuais de finos de carvão vegetal.

Essa relação é comprovada pela análise de componentes principais, na qual é possível observar a formação de um ângulo de aproximadamente 180° entre os vetores granulometria média e teor de finos, o que indica correlação inversa entre as variáveis.

Observa-se uma relação direta entre o teor de finos e a densidade a granel para os estoques 1 e 3 do forno RAC 700. De acordo os mapas temáticos, verifica-se que as regiões que apresentaram os maiores teores de finos, também apresentaram maior densidade a granel. Tal fato, também é confirmado pela análise de componentes, em que um ângulo de 90° foi formado entre estas duas propriedades, indicando correlação direta entre os dois parâmetros.

O carvão vegetal que apresenta menor granulometria, de modo geral, ocupa os espaços vazios existente entre as peças de maior granulometria, aumentando, assim, a massa de carvão vegetal para uma mesma unidade de volume.

Os teores de carbono fixo e cinzas apresentaram relações similares tanto para o estoque 1 quanto para o estoque 3, sendo que as regiões que apresentaram maior teor de carbono fixo apresentaram, também, maior teor de cinzas. Tal relação foi confirmada por meio da análise de componentes principais, uma vez que, os vetores que representam essas propriedades apresentaram ângulos entre si inferiores a 90° . Durante o processo de degradação térmica da madeira os materiais voláteis são retirados da madeira na forma de gases condensáveis e não-condensáveis, concentrando, dessa forma, o carbono fixo e as cinzas (VAN DER STELT *et al.*, 2011).

Para o estoque 2, observa-se uma relação inversa entre o teor de carbono fixo e cinzas. Os vetores dessas duas propriedades apresentaram ângulo maior que 90° para a análise de componentes principais. Possivelmente, essa relação inversa ocorreu devido a contaminações do carvão com terra, proveniente do solo, que pode ter se misturado ao carvão vegetal na retirada do forno e/ou na formação do estoque, bem como na retirada das amostras para análise.

5.3. Relações entre as propriedades do carvão vegetal nos estoques do forno RAC 220

Na Tabela 7 estão apresentadas as estimativas de variância explicadas pelas componentes principais e seus respectivos autovalor dos estoques avaliados, para o forno RAC 220.

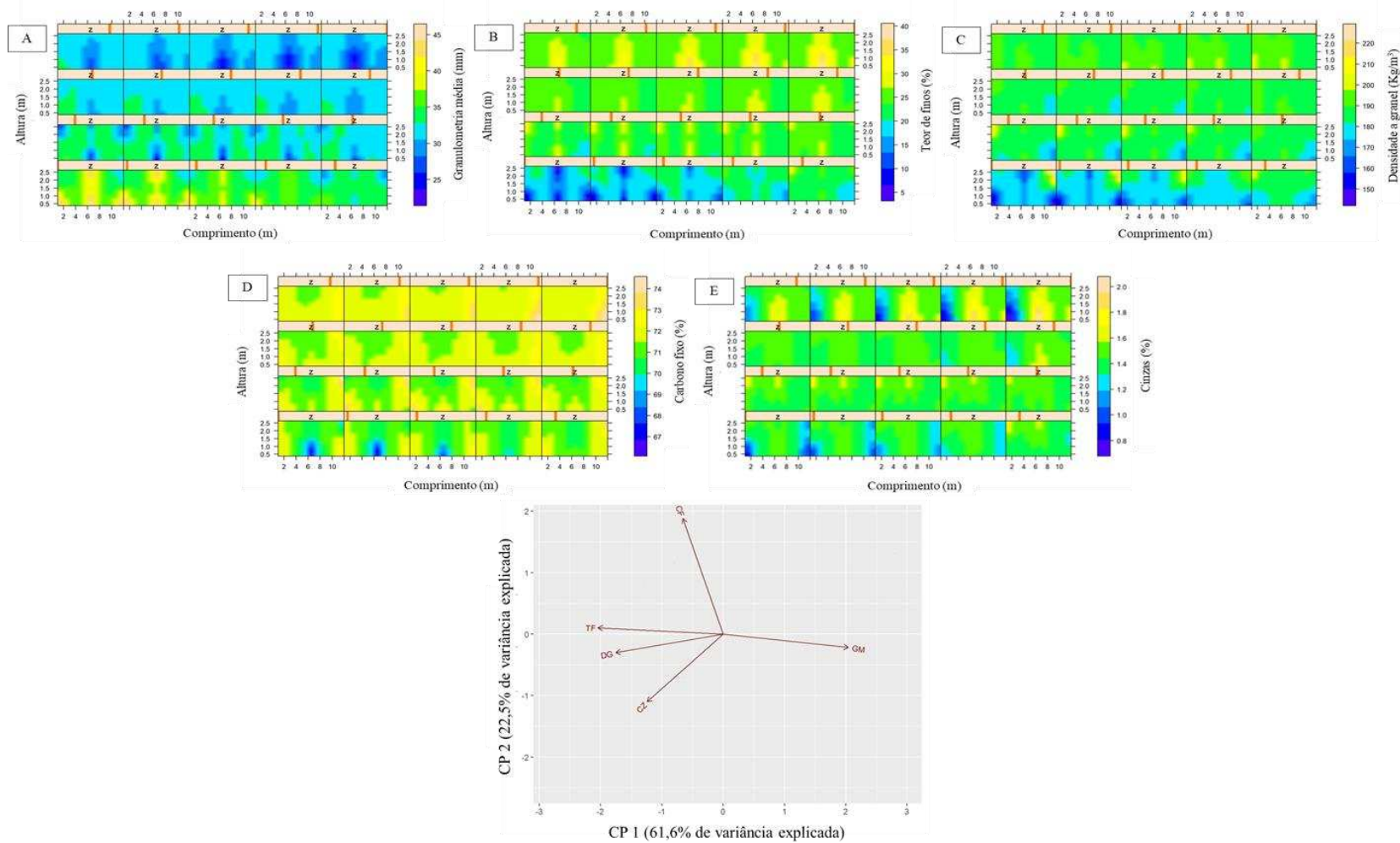
Tabela 7 - Estimativa da variância associada as componentes principais e respectivo autovalor para os estoques do forno tipo RAC 220

Componentes Principais	Variância explicada (%)			Autovalores		
	Estoque 1	Estoque 2	Estoque 3	Estoque 1	Estoque 2	Estoque 3
CP1	61,6*	42,5*	57,7*	3,0*	2,2*	2,8*
CP2	22,5*	34,7*	21,5*	1,2*	1,7*	1,3*
CP3	13,4	13,2	11,62	0,7	0,6	0,8
CP4	1,8	6,2	9,4	0,3	0,3	0,4
CP5	0,6	3,4	0,2	0,2	0,1	0,1

* Componente principal que explica pelo menos 20% da variabilidade do estoque e apresenta autovalores maior que 1.

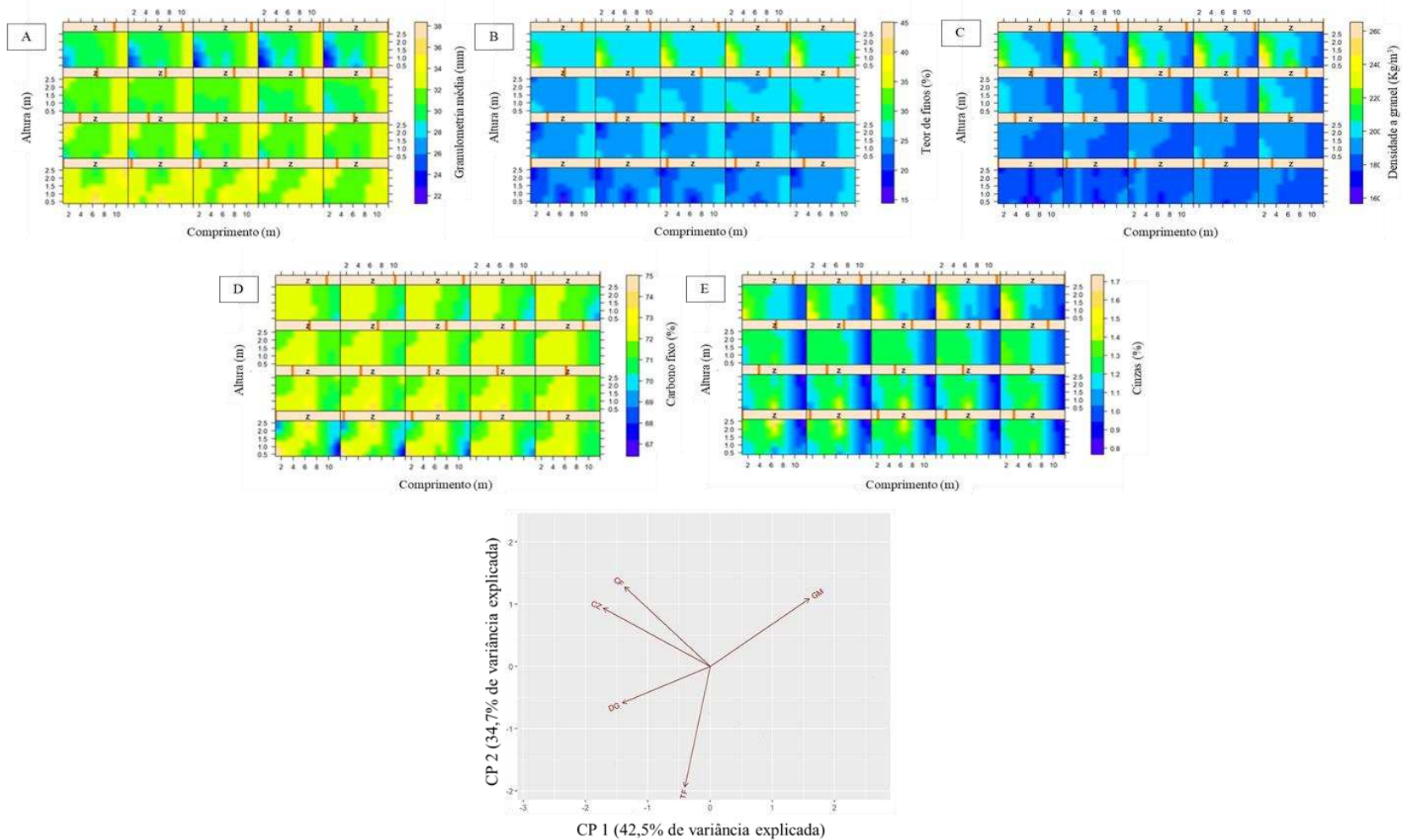
O critério utilizado para a seleção das componentes principais foi explicar pelo menos 20% da variabilidade do estoque e apresentar autovalores maior que 1. Deste modo, foram selecionadas as Componente Principal 1 (CP1) e Componente Principal 2 (CP2), de todos os três estoques avaliados do forno RAC 220.

Nas Figuras 10, 11 e 12 estão apresentadas a distribuição geoespacial das propriedades do carvão vegetal e análise de componentes principais para os estoques do forno tipo RAC 220.



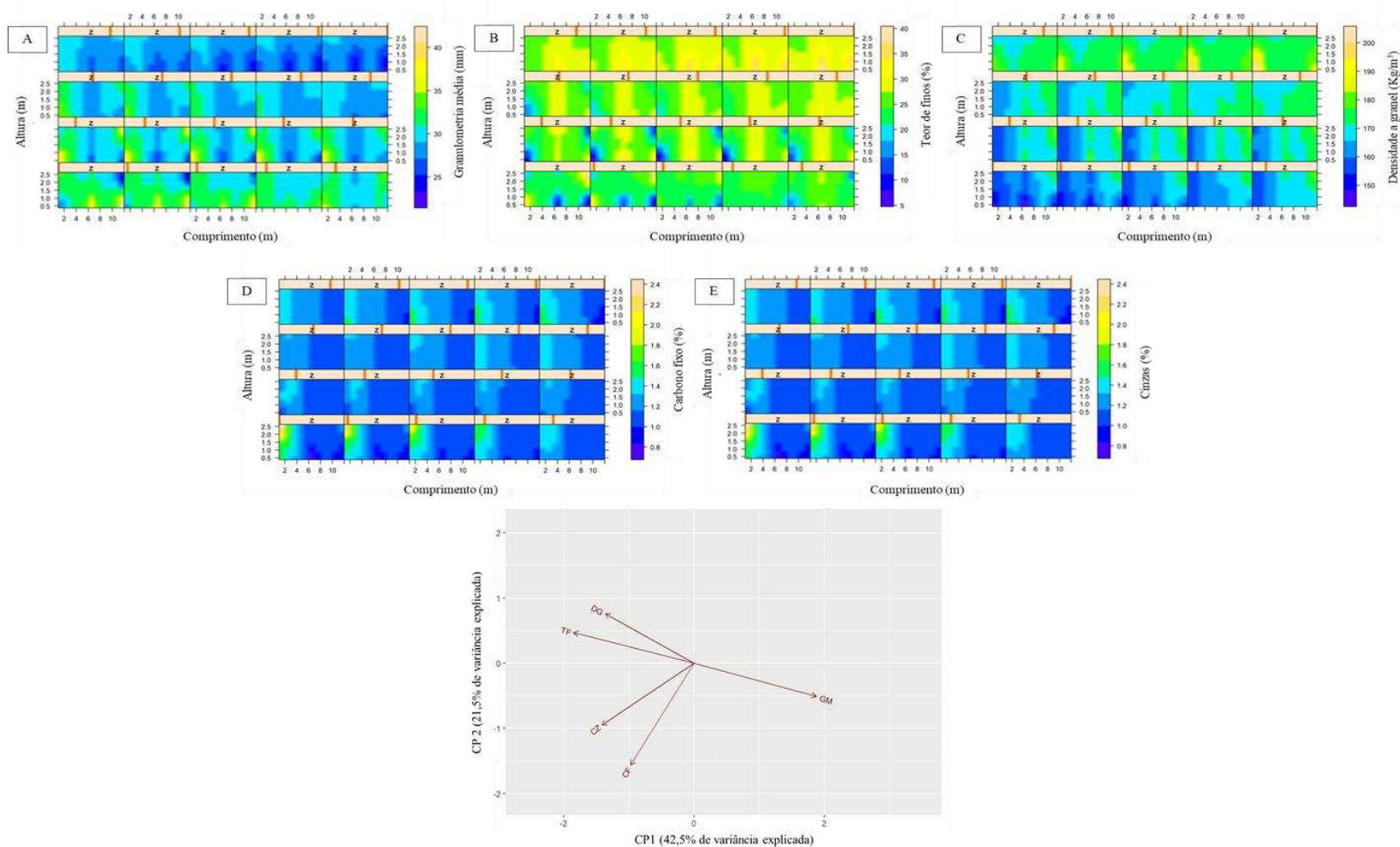
Legenda: GM – granulometria média; TF – teor de finos; DG – densidade a granel; CF – carbono fixo; CZ – cinzas.

Figura 10 - Distribuição espacial da granulometria média (A), teor de finos (B), densidade a granel (C), carbono fixo (D), cinzas (E) e autovetores das propriedades em relação as componentes principais 1 e 2 para o estoque 1 (RAC 220).



Legenda: GM – granulometria média; TF – teor de finos; DG – densidade a granel; CF – carbono fixo; CZ – cinzas.

Figura 11 - Distribuição espacial da granulometria média (A), teor de finos (B), densidade a granel (C), carbono fixo (D), cinzas (E) e autovetores das propriedades em relação as componentes principais 1 e 2 para o estoque 2 (RAC 220).



Legenda: GM – granulometria média; TF – teor de finos; DG – densidade a granel; CF – carbono fixo; CZ – cinzas.

Figura 12 - Distribuição espacial da granulometria média (A), teor de finos (B), densidade a granel (C), carbono fixo (D), cinzas (E) e autovetores das propriedades em relação as componentes principais 1 e 2 para o estoque 3 (RAC 220).

De acordo com as Figuras 12, 13 e 14, é possível observar que, para a maior parte das propriedades, as relações entre as variáveis do carvão vegetal foram semelhantes aos resultados obtidos nos estoques provenientes dos fornos do tipo RAC 700.

Observa-se uma relação inversa entre a granulometria média e o teor de finos, relação essa que pode ser explicada pela fórmula (1), em que a medida que se aumenta a quantidade de carvão retida nas peneiras de menor malha, diminui-se a granulometria média do carvão vegetal. Tal relação pode ser confirmada pela análise de componentes principais, uma vez que para os três estoques avaliados do forno RAC 220, os vetores dessas propriedades apresentaram ângulos entre si próximos a 180° .

Observa-se a existência de uma relação direta entre a densidade a granel e o teor de finos, constatada pela análise de componentes principais, onde os vetores formados por essas propriedades apresentaram um ângulo entre si menor que 90° . Assim como mencionado anteriormente, o carvão vegetal de menor tamanho ocupa os espaços vazios entre as peças maiores, aumentando, portanto, a massa de carvão vegetal para uma mesma unidade de volume.

A relação entre o carbono fixo e o teor de cinzas pode ser observada nos mapas temáticos como sendo uma relação direta, onde quanto maior o teor de carbono fixo maior o teor de cinzas. Entretanto, essa relação foi observada apenas para os estoques 2 e 3. Para o estoque 1, foi observado que quanto maior o teor de cinzas menor o carbono fixo. Assim como dito anteriormente, essa relação inversa pode ter ocorrido devido a contaminações do carvão com terra, proveniente do solo que pode ter se misturado ao carvão vegetal nos momentos de movimentação do mesmo.

5.4. Efeito da posição nas propriedades do carvão vegetal no estoque do RAC 700

A Tabela 8 estão apresentadas as estimativas das variâncias explicadas pela predição das propriedades do carvão vegetal, em função da posição no estoque (comprimento, altura e largura), para o forno RAC 700.

Tabela 8 - Estimativas de variância explicada pela posição no estoque para as propriedades do carvão vegetal, no forno RAC 700

Propriedades	Variância explicada (%)		
	Estoque 1	Estoque 2	Estoque 3
Granulometria média	31,23*	46,55*	0
Teor de finos	47,80*	54,95*	43,16*
Densidade a granel	17,59	3,57	27,44*
Teor de carbono fixo	0	21,66*	31,16*
Teor de cinzas	12,69	0	23,59*

* variâncias assumidas como significativas por apresentar valor acima de 20%.

De acordo com o critério de seleção adotado no estudo, em que foram assumidas como significativas aquelas variâncias que apresentou valor acima de 20%, observou-se efeito da posição nas seguintes propriedades do carvão vegetal: granulometria média (estoque 1 e 2); teor de finos (estoque 1, 2 e 3); densidade a granel (estoque 3); carbono fixo (estoque 3) e teor de cinzas (estoque 3).

A distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal e grau de importância das posições (comprimento, altura e largura), dos estoques 1 e 2, do forno RAC 700, são apresentados na Figura 13.

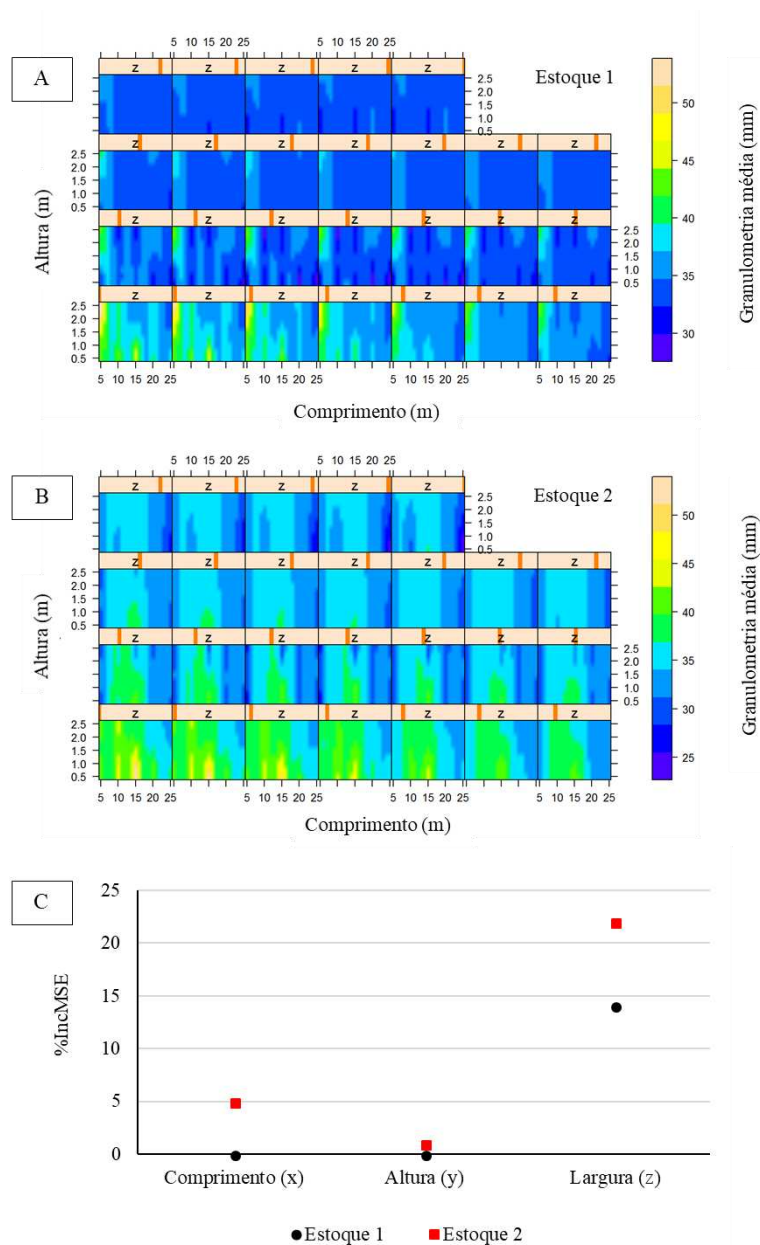


Figura 13 - Distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal para o estoque 1 (A) e estoque 2 (B), do forno RAC 700 e grau de importância da posição mensurada por meio do *Random forest* (C).

Observa-se nos mapas temáticos, que há uma influência da posição do carvão vegetal sobre a granulometria média, sendo que, as posições explicaram 31,23% e 46,55% da variabilidade de tal propriedade, para os estoques 1 e 2, respectivamente. Verifica-se que a largura (z) do estoque é a posição que apresentou maior influência sobre os valores de granulometria do carvão (Fig 5). Observa-se que a medida que a coordenada z (largura) desloca-se para os mapas posteriores, ocorre diminuição da granulometria média do carvão.

A confirmação de tal relação pode ser constatada pelo grau de importância (%IncMSE) da posição na explicação da variação da granulometria média. Observa-se que a largura (z) apresentou um grau de importância (%IncMSE) de 14 e 22%, respectivamente, para os estoques 1 e 2. Durante a formação do estoque de carvão vegetal pela pá carregadeira, de modo geral, ocorre a segregação das peças de carvão vegetal, em que, as peças maiores tendem a se acomodar nas porções mais superficiais do estoque, em detrimento das peças menores, que se acomodam nos espaços vazios deixados entre os carvões já depositados.

Na figura 14 são apresentados a distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal e o grau de importância das posições (comprimento, altura e largura) para os estoques do forno RAC 700.

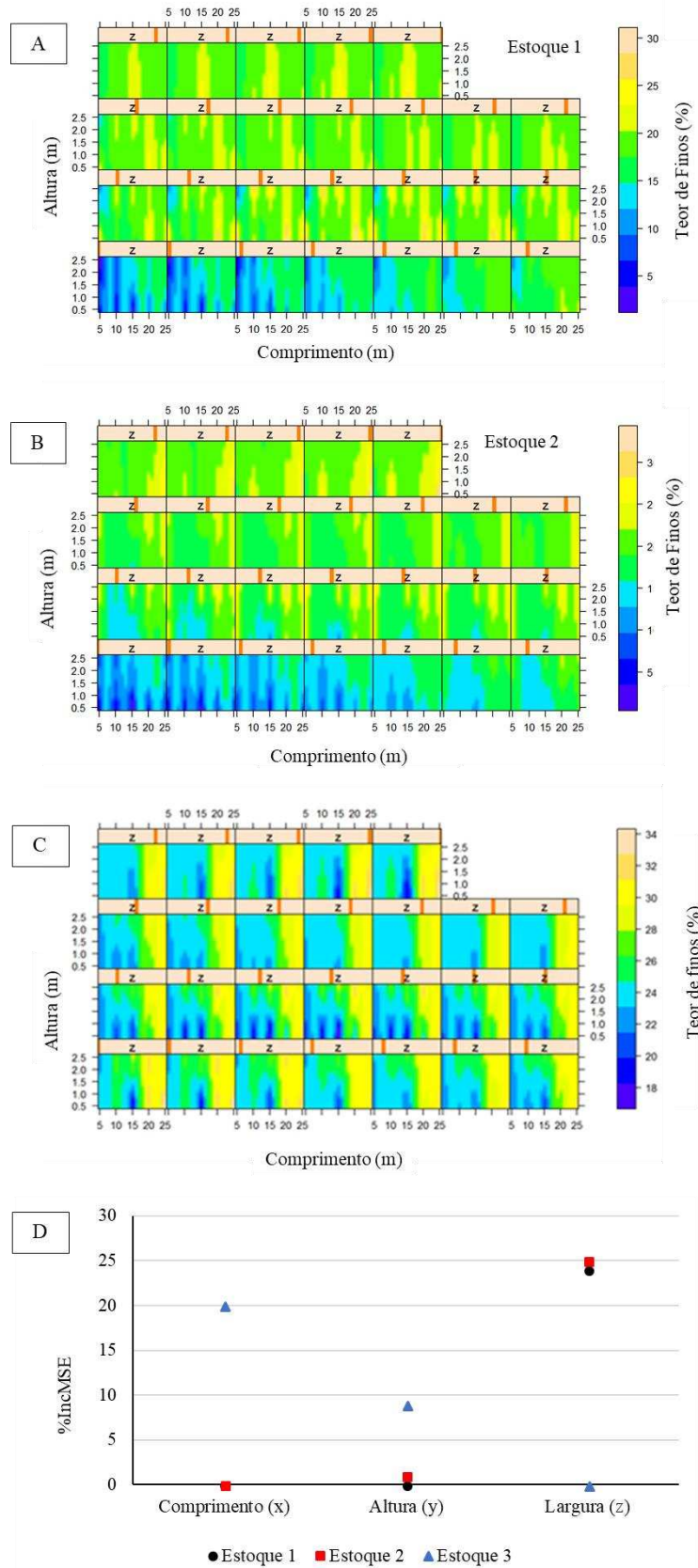


Figura 14 - Distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal para o estoque 1 (A), estoque 2 (B) e estoque 3 (C) do forno RAC 700 e grau de importância da posição mensurada por meio do *Random forest* (D).

De acordo com os mapas temáticos apresentados para os estoques 1 e 2, verifica-se que à medida que a coordenada z (largura) desloca-se para os mapas posteriores, observa-se aumento nos valores de teor de finos. Entretanto, para o estoque 3, verifica-se a ocorrência de um aumento nos percentuais de finos com o deslocamento da coordenada x (comprimento).

As posições juntas explicaram 46,34 e 54,43% da variância do teor de finos nos estoques 1 e 2, respectivamente. Quanto ao grau de importância (%IncMSE), observa-se que a largura (z) foi a que mais contribuiu para explicação da variação do teor de finos do carvão vegetal, apresentando percentuais de 24 e 26%, para os estoques 1 e 2, respectivamente. Durante a formação do estoque de carvão vegetal pela pá carregadeira, as peças menores se acomodam nos espaços vazios deixados entre os carvões já depositados, favorecendo, portanto, maior percentual de carvões de menor granulometria.

Para o estoque 3, a coordenada x (comprimento) foi aquela que apresentou maior influência sobre teor de finos de carvão vegetal. Apesar de serem provenientes do mesmo tamanho de forno, observou-se uma diferença entre os estoques no que diz respeito ao efeito da posição no teor de finos do carvão vegetal. Assim como dito anteriormente, alguns fatores não controlados podem ter ocorrido, como a movimentação excessiva do carvão no momento da descarga, o que pode ter ocasionado quebras nas peças do carvão vegetal e, desse modo, aumentando o teor de finos em determinada região do estoque.

Nas Figuras 15, 16 e 17 são apresentadas a distribuição espacial da densidade básica, teor de carbono fixo e teor de cinzas do carvão vegetal e grau de importância das posições (comprimento, altura e largura) para o estoque 3 do forno RAC 700, nas propriedades do carvão vegetal. Salienta-se que para os estoques 1 e 2, não foi observado nenhuma influência das coordenadas (x, y, z) nestas propriedades.

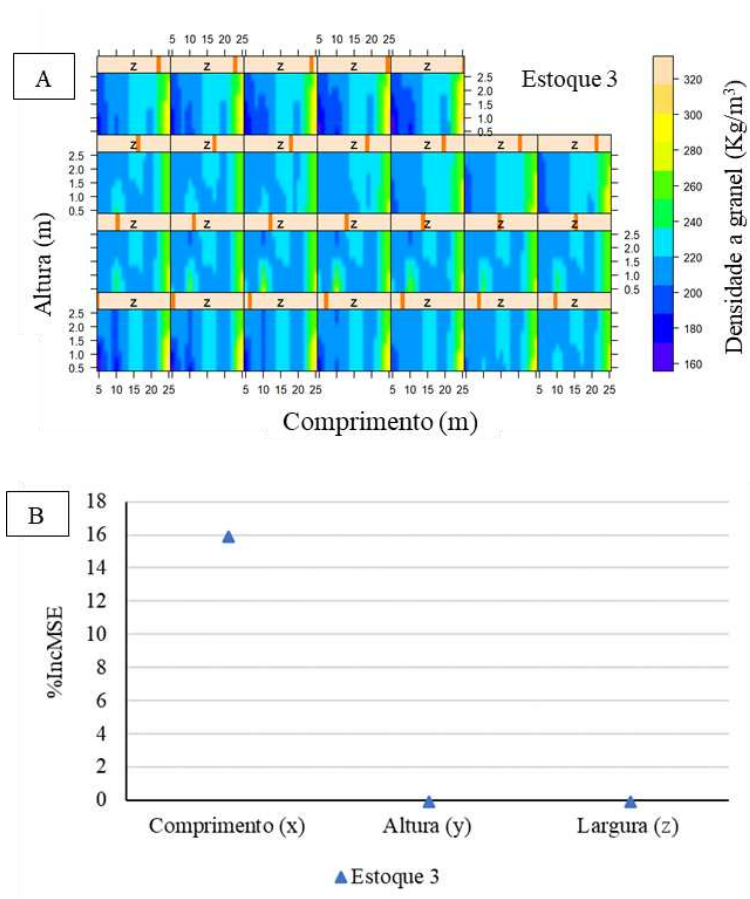


Figura 15 - Distribuição espacial da densidade a granel para o estoque 3 (A) do forno RAC 700 e grau de importância da posição mensurada por meio do *Random forest* (B).

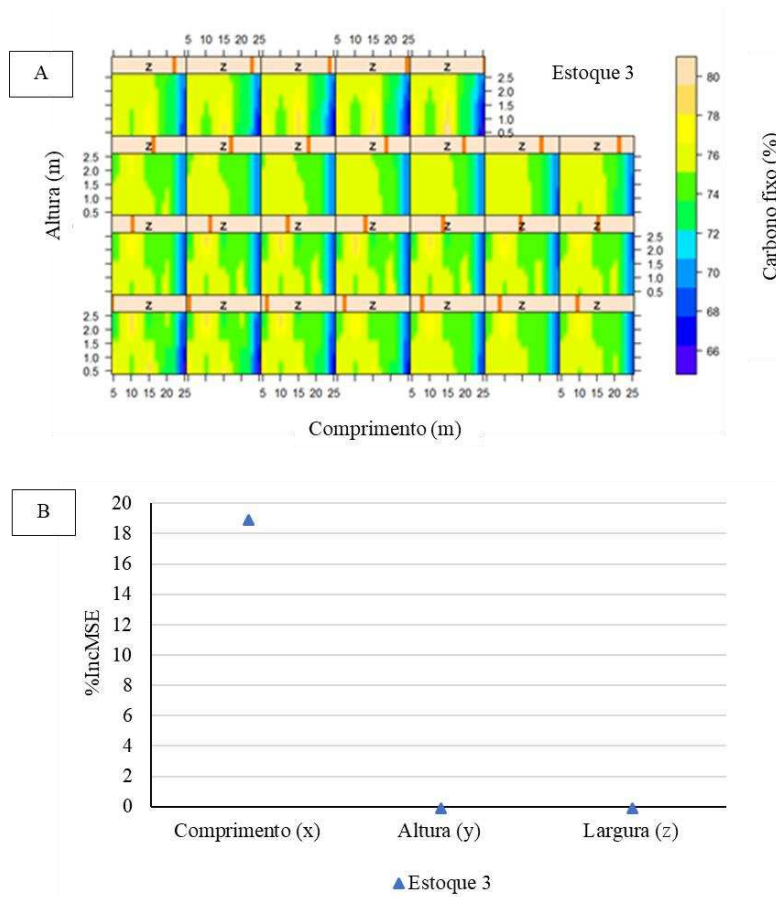


Figura 16 - Distribuição espacial do teor de carbono fixo do carvão vegetal para o estoque 3 (A), do forno RAC 700 e grau de importância da posição mensurada por meio do *Random forest* (B).

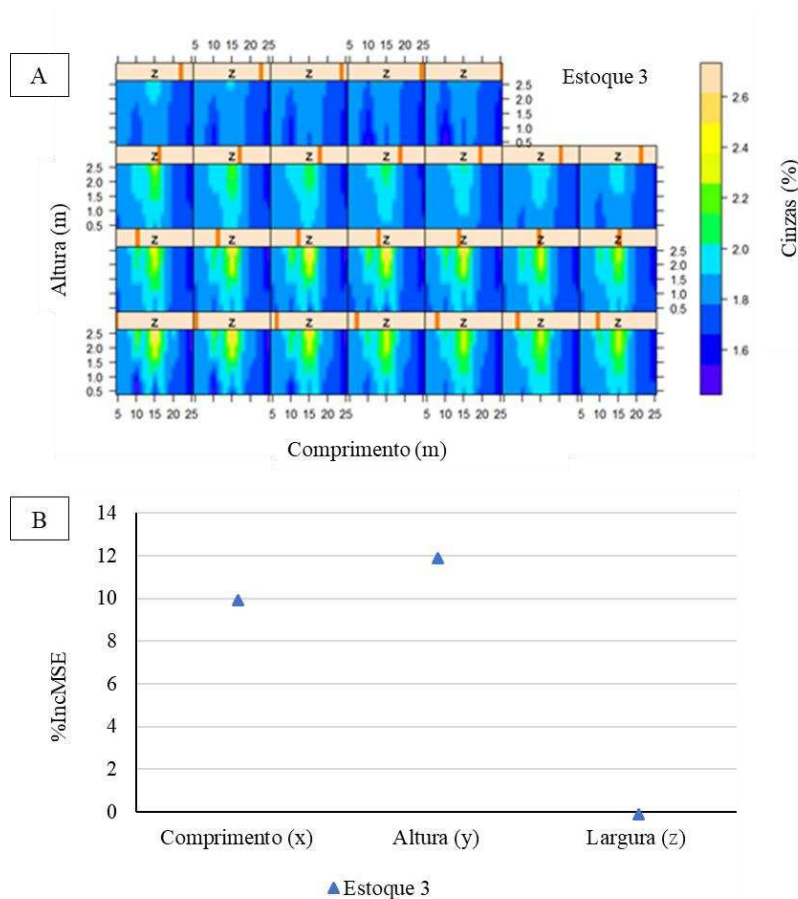


Figura 17 - Distribuição espacial do teor de cinzas do carvão vegetal para o estoque 3 (A) do forno RAC 700 e grau de importância da posição mensurada por meio do *Random forest* (B).

Para o estoque 3, observou-se efeito da posição do estoque na densidade a granel e nos teores de teor de carbono fixo e cinzas. De acordo com a Figura 17, observa-se que os valores de densidade a granel apresentaram variações em função do comprimento (x) do estoque de carvão vegetal. Obteve-se valor de variância explicada para essa propriedade foi de 21,66%, sendo que o comprimento (x) apresentou grau de importância de 19%. Uma vez que a densidade a granel apresenta correlação direta com o teor de finos (Figura 10), o efeito do comprimento do estoque no teor de finos (Figura 15) acarretou o mesmo efeito na densidade a granel.

Verifica-se, também, efeito da posição para os teores de carbono fixo e cinzas, sendo que o comprimento, altura e largura do estoque de carvão explicaram 31,16 e 23,59% da variação dessas propriedades, respectivamente. Quanto ao grau de importância, para o teor de carbono fixo, o comprimento apresentou valor de 19%. Já para o teor de finos, o comprimento e altura apresentaram valor de 10 e 12%, respectivamente.

Não foi verificado nenhum efeito para os estoques 1 e 2 provenientes do forno RAC 700. Isso ocorreu, provavelmente, devido à ocorrência de fatores não controlados no processo, como por exemplo, um aumento da temperatura em alguma região do forno que pode ter afetado tais propriedades.

5.5. Efeito da posição nas propriedades do carvão vegetal no estoque do RAC 220

Não foi observada nenhuma relação entre as coordenadas (x, y, z) do estoque e as propriedades do carvão vegetal para o forno RAC 220. Esta diferença entre os estoques pode ter ocorrido devido a diferença de tamanho dos fornos, pois, fornos com uma maior capacidade de produção tendem a apresentar maior dificuldade no controle da carbonização e maior movimentação do carvão para formação do estoque, em relação a fornos com menores capacidade, o que pode refletir na heterogeneidade do carvão.

6. CONCLUSÃO

Relações semelhantes entre as propriedades do carvão vegetal foram observada tanto para os estoques do forno tipo RAC 700, quanto para o RAC 220. De forma geral, a granulometria média apresenta relação negativa com teor de finos. A densidade a granel, apresenta relação positiva com o teor de finos. E, por fim, o teor de carbono fixo apresenta uma relação positiva com teor de cinzas.

O efeito das posições (comprimento, altura e largura) do estoque nas propriedades do carvão vegetal, para os estoques provenientes dos fornos RAC 700, evidencia a necessidade de uma amostragem que contemple todas as posições do estoque.

A utilização da interpolação IDW em conjunto com a análise de componentes principais e aprendizagem de máquina, possibilita, por meio das avaliações dos mapas temáticos, a realização de inferências a respeito da qualidade do carvão vegetal em diferentes estoques industriais. Além disto, propicia a observação de possíveis problemas durante o processo de produção, como por exemplo, a possível existência de contaminantes no carvão de alguns estoques. Acredita-se que, para a gestão de uma unidade produtora, tais observações permitem a identificação de problemas ao longo processo produtivo, possibilitando solucioná-los antes que causem grandes prejuízos econômicos, melhorando o controle de qualidade da empresa.

7. REFERENCIAL TEÓRICO

ABOYEJI, O.S.; EIGBOKHAN, S.F. Evaluations of groundwater contamination by leachates around Olusosun open dumpsite in Lago metropolis, southwest Nigeria. **Journal of Environmental Management**, v.183, 2016, p.333-341.

ANDREWS, S.S.; KARLEN, D.L.; MITCHELL, J.P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production system in Northern California. **Agricultural Ecosystem Environmental**, v.90, 2002, p.25-45.

ARUN, P.V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v.16, n.2, 2013, p.133-139.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6922: Carvão vegetal – Ensaios físicos determinação da massa específica (densidade à granel)**. 1981. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6923: Carvão vegetal – Amostragem e preparação de amostra**. 1981. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 7402: Carvão vegetal – Determinação granulométrica**. 1982. 3p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 8112: Carvão vegetal – Análise Química imediata**. 1986. 5p.

BARROSO, R. C. **Redução do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal por concentração gravítica a seco**. 2007. 111p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

BELLOTI, F.; CAPRA, L.; D'ANTONIO, M. Geostatistics and multivariate analysis as a too to characterize volcanoclastic deposit: Application to Nevado de Toluca volcano, Mexico. **Jornal of Volcanology and Geothermal research**, v.191, 2010, p.117-128.

BOKEN, V. K.; HOOGENBOOM, G.; HOOK, J. E.; THOMAS, D. L.; GUERRA, L. C.; HARRISON, K. A. Agricultural water use estimation using geospatial modeling and a geographic information system. **Agricultural Water Management**, v.67, n.3, 2004, p.185-189.

DEO, R.C. **Machine Learning in Medicine**. Basic Science for Clinicians, v.132, 2015, p.1920-1930.

DESAVATHU, R.N.; NADIPENA, A.R.; PEDDADA, J.R. Assessment of soil fertility status in Paderu Mandal, Visakhapatnam district of Andhra Pradesh through Geospatial techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v.21, n.1 2018, p.73-81.

DIXON, D.; UDDAMERI, V. **Gis and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering, first edition**. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK, 2016.

Empresa de Pesquisa Energética, EPE. **Balço Energético Nacional 2012: Ano Base 2016**. Rio de Janeiro, 2017.

FAOSTAT – **Food and agriculture organization of the United Nations statistics**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/>. Acessado em: 10/02/2018.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GABRIEL, K.R. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. **Biometrika**, v.58, n.03, 1971, p.453-467.

GREGO, C.R.; OLVEIRA, R.P. **Conceitos Básicos da Geoestatística**. In: Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper, In: Oliveira, R.P.; Grego, C.R.; Brandão, Z.N. (Ed) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2015, p.23.

HOU, D.; O'CONNOR, D.; NATHANAIL, P.; TIAN, L.; MA, Y. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review. **Environmental Pollution**, V.231, 2017, p.1188-1200

HUANG, F.; LIU, D.; TAN, X.; WANG, J.; CHEN, Y.; HE, B. Explorations of the implementation of a parallel IDW interpolation algorithm in a Linux cluster-based parallel GIS. **Computers & Geosciences**, v.37, 2011, p.426-434.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES– IBA. 2016. **Relatório 2016: ano base 2015**. 2016. 80 p.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, Sixth Edition, 2007, 773p.

LI, J.; HEAP, A.D.; POTTER, A. HUANG, Z.; DANIELL. J.J. Can we improve the spatial predictions of seabased sediments? A case study of spatial interpolation of mud content across the southwest Australian margin. **Continental Shelf Research**, v.31, 2011, p.1365-1376.

LIAW, A. e WIENER, M. Package 'randomForest': Breiman and Cutler's random forests for classification and regression. **R Development Core Team**, v.4, 2014, p.6-10.

LIAW, A. AND WIENER, M. Classification and Regression by randomForest. **R News**, v.2, n.3, 2002, p.18-22.

LOBATO, T.C.; HAUSER-DAVIS, R.A.; OLIVEIRA, T.F.; SILVEIRA, A.M.; SILVA, H.A.N.; SARAIVA, A.C.F.; TAVARES, M.R.M. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation, a case study in the Amazon region. **Journal of Hydrology**, v.522, 2015, p.674-683.

MIRANDA, G.H.N. **Análise de amostragem e interpolação na geração de MDE**. 2017. 65p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

OLIVEIRA, A. C., SALLES, T.T.; PEPREIA, B.L.C.; CARNEIRO, A.C.O.; BRAGA, C.S.; SANTOS, R.C. Viabilidade econômica da produção de carvão vegetal em dois sistemas produtivos. **FLORESTA**, v.44, n.1, 2014, p.43–52.

OLIVEIRA, A.C. **Sistema forno-fornalha para a produção de carvão vegetal**. 2012. 64p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PEBESMA, E.J. Multivariable geostatistics in R: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v.30, 2004 p.683-691

PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, A.C.; FONTES, M.P.F. Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v.8, 2013, p.4574–4592.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2017. <https://www.R-project.org/>.

RAAD, T.J. **Simulação do processo de secagem e carbonização de *Eucalyptus* spp.** 2004. 115p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004

SAMOHYL, R.W. **Controle de estatístico de qualidade**. Elsevier, 1ed, 2009, 352p.

SANTOS, R.C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 173p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SCORNET, E. On the asymptotics of random forests. **Journal of Multivariate Analysis**, v.146, 2016, p.72-83.

SOOHOO, W.M. **Geospatial modeling and assessment of the environmentally sensitive lands in the midwestern U.S.** 2016. 45p. Master's thesis - University of South Carolina, 2016.

TAHA.M.M.M.; ELBARBARY, S.M.; NAGUIB, D.M.; EL-SHAMY, I.Z. Flash flood hazard zonation based on basin morphometry using remote sensing and GIS techniques: A casa study of Wadi Qena basin, Eastern Desert, Egypt. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.8, 2017, p.157-167.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v.35, 2011, p.3748-3762.

VITAL, M.H.F.; PINTO, M.A.C. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.30, 2009, p.237-297.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 350p.

ANEXO 1 – Distribuição espacial das propriedades do carvão vegetal para o forno RAC

700

ANEXO 1A – Estoque 1

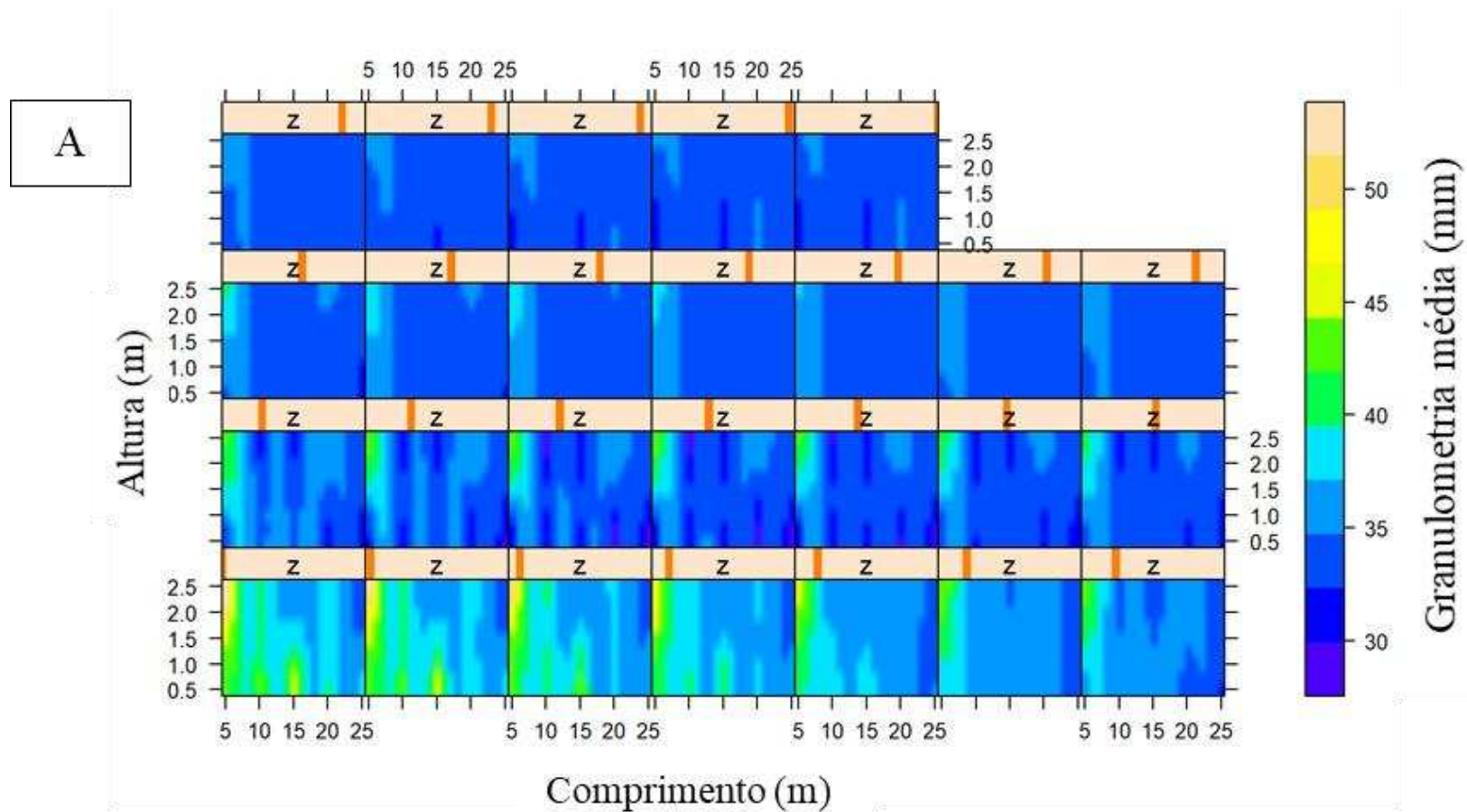


Figura 1 - Distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal para o estoque 1.

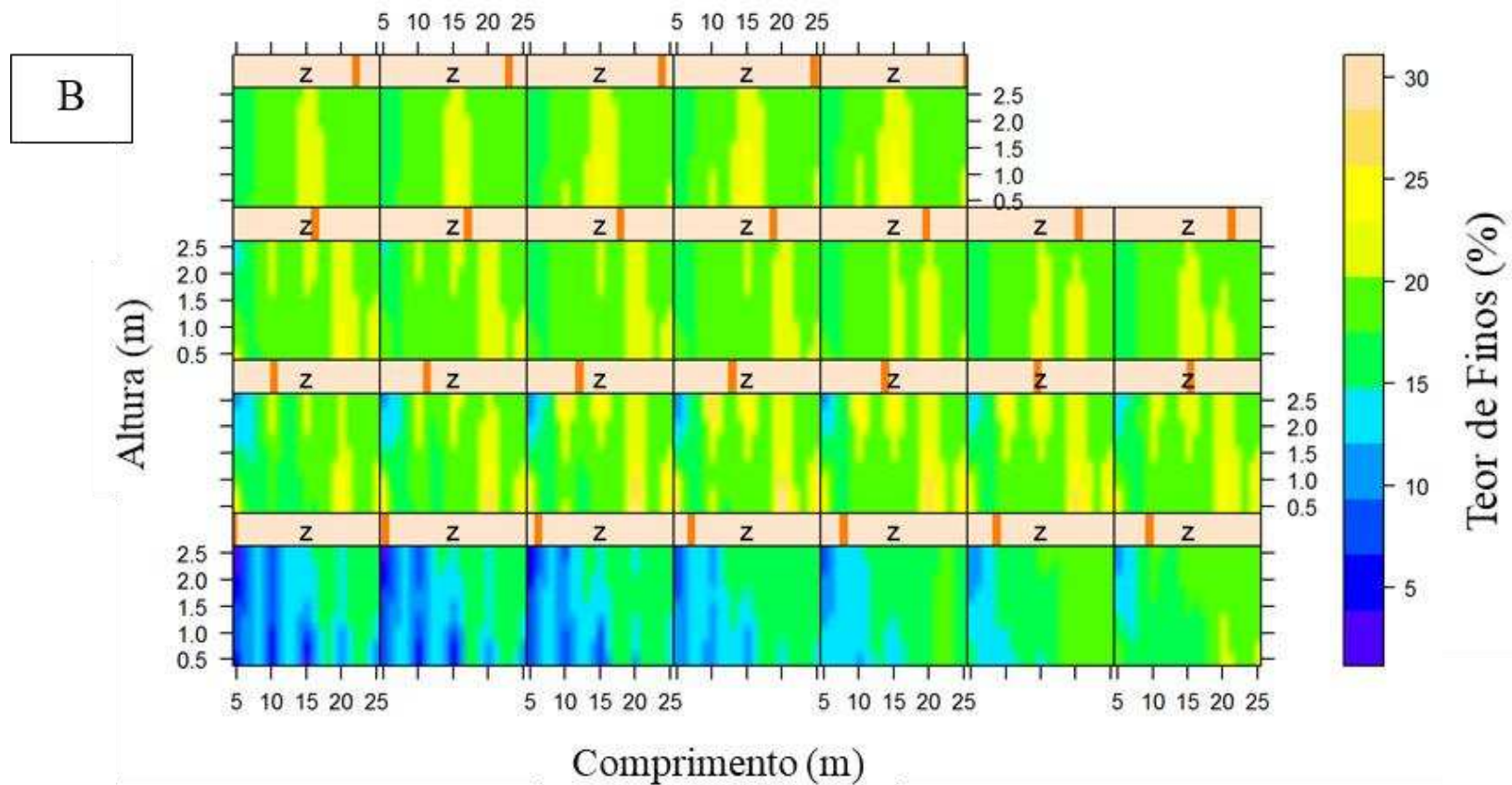


Figura 2 - Distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal para o estoque 1.

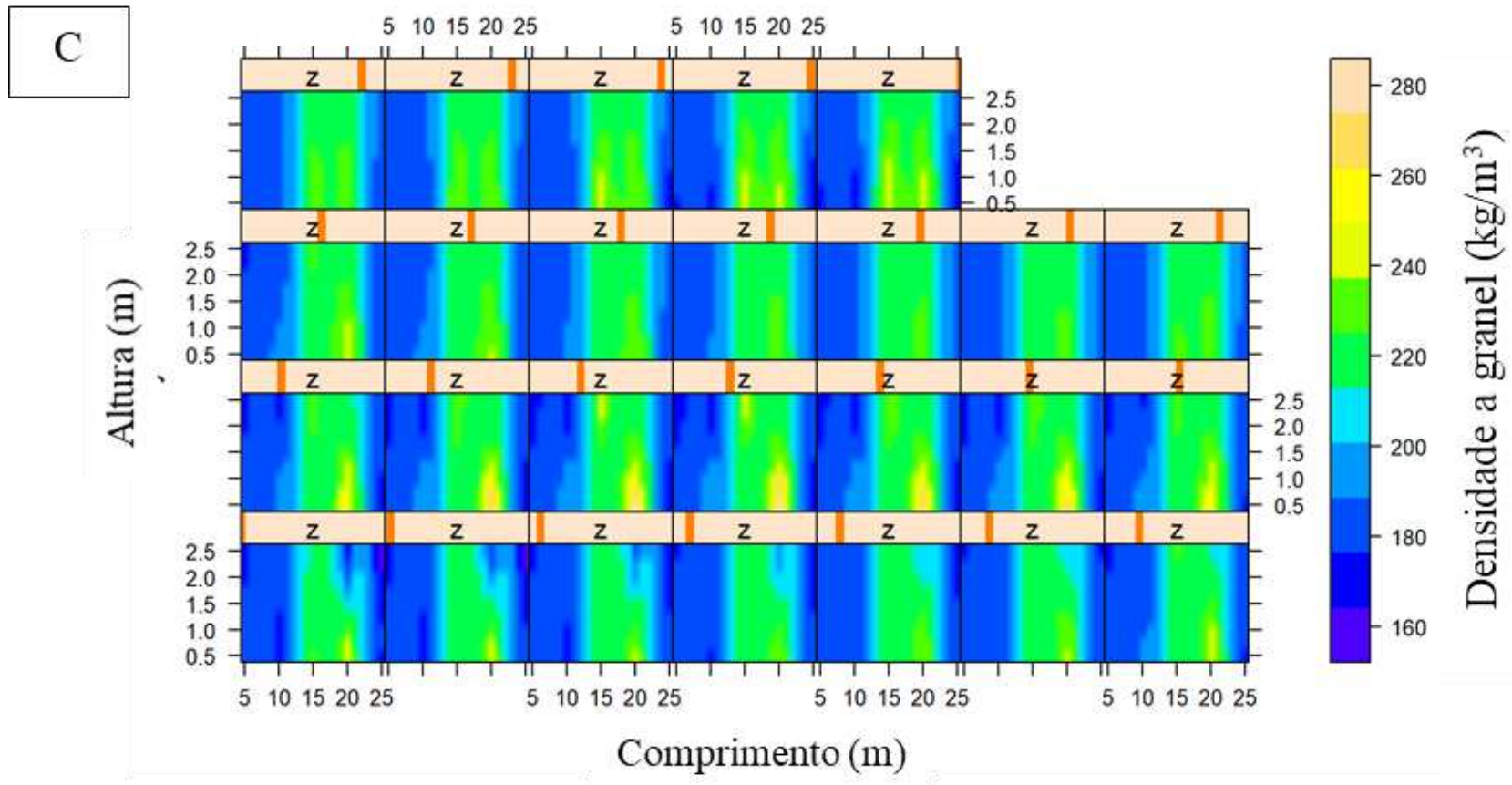


Figura 3 - Distribuição espacial da densidade a granel do carvão vegetal para o estoque 1.

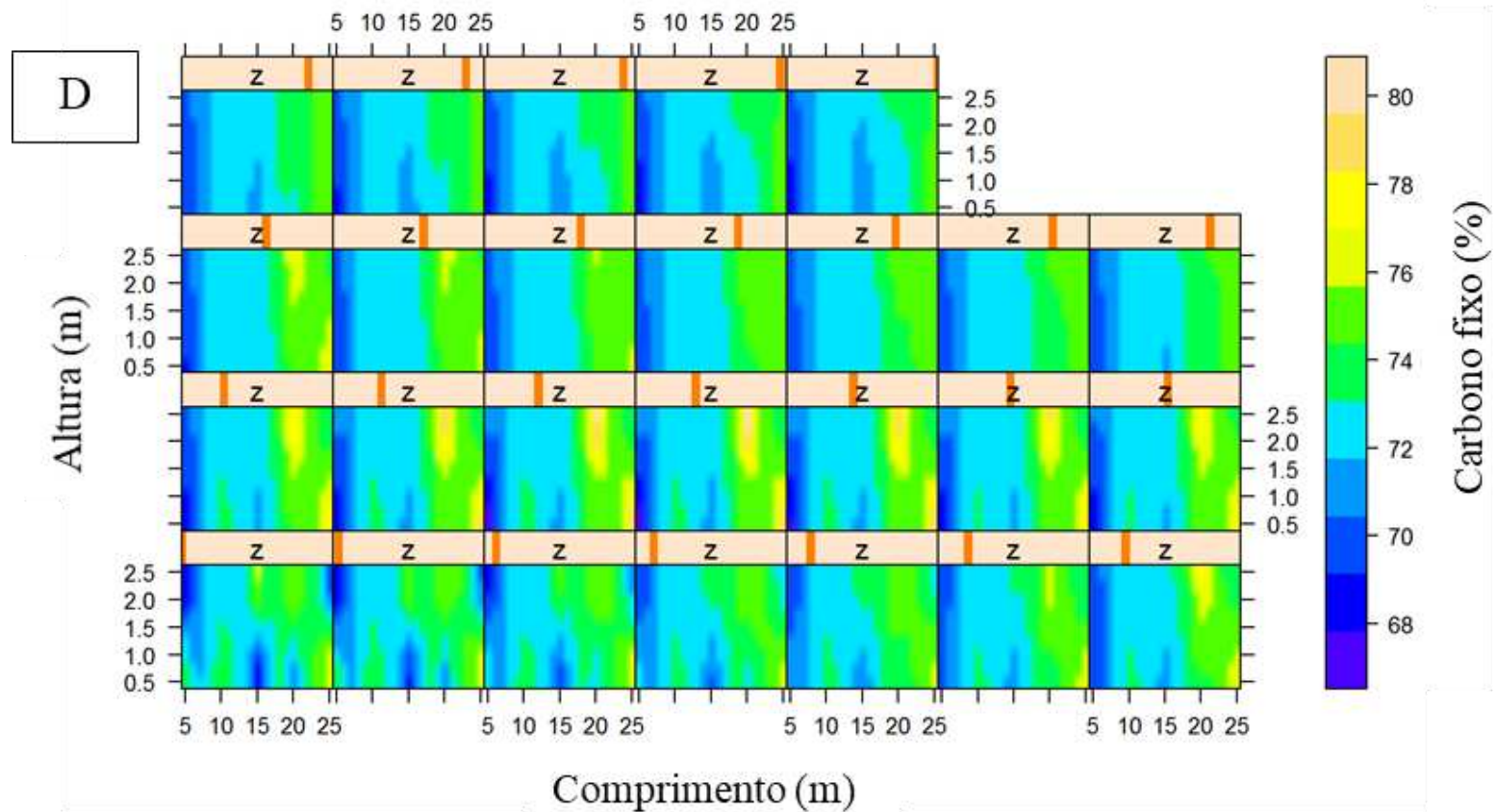


Figura 4 - Distribuição espacial do teor de carbono fixo do carvão vegetal para o estoque 1.

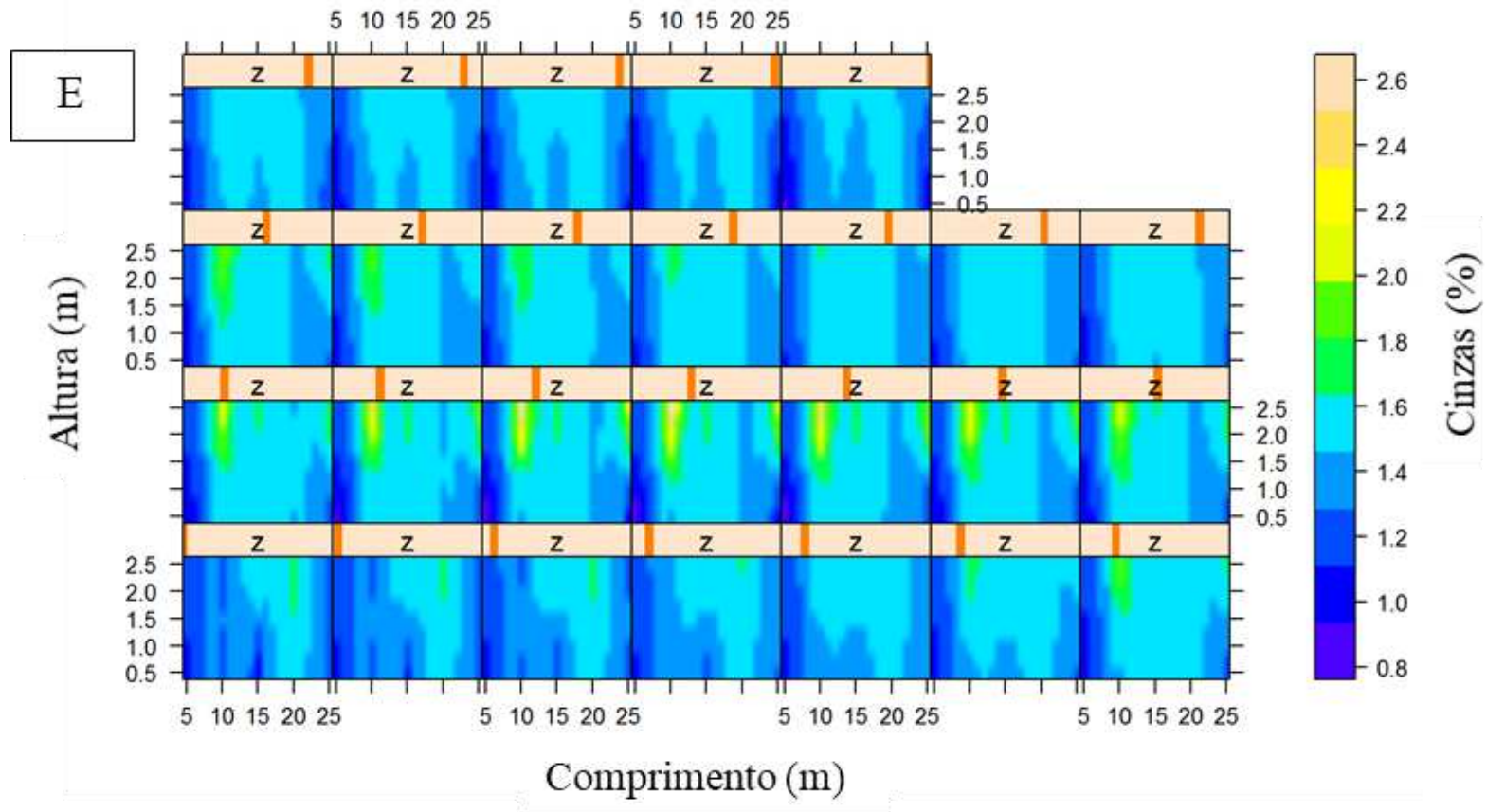


Figura 5 - Distribuição espacial do teor de cinzas do carvão vegetal para o estoque 1.

ANEXO 1B – Estoque 2

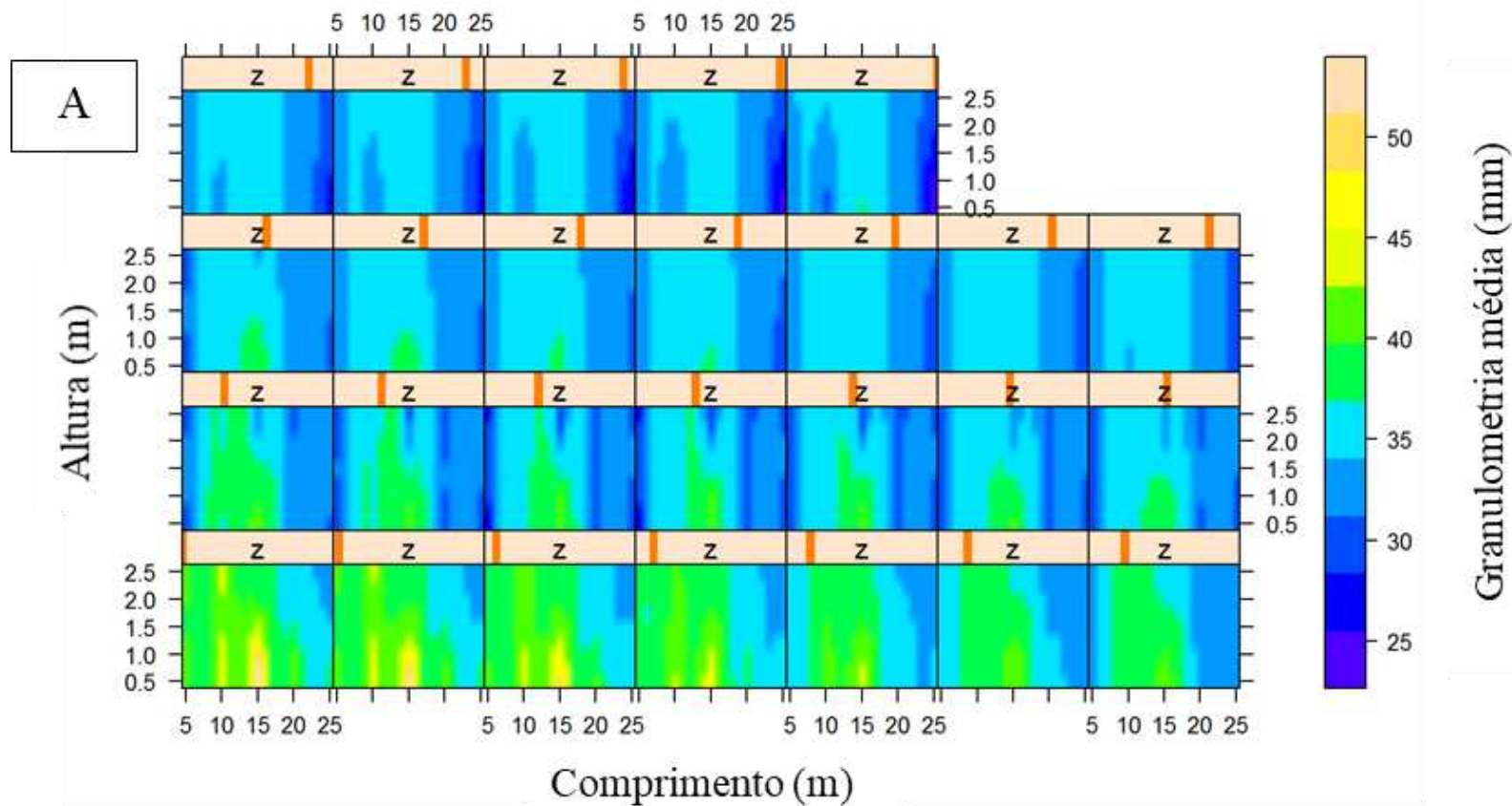


Figura 6 - Distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal para o estoque 2.

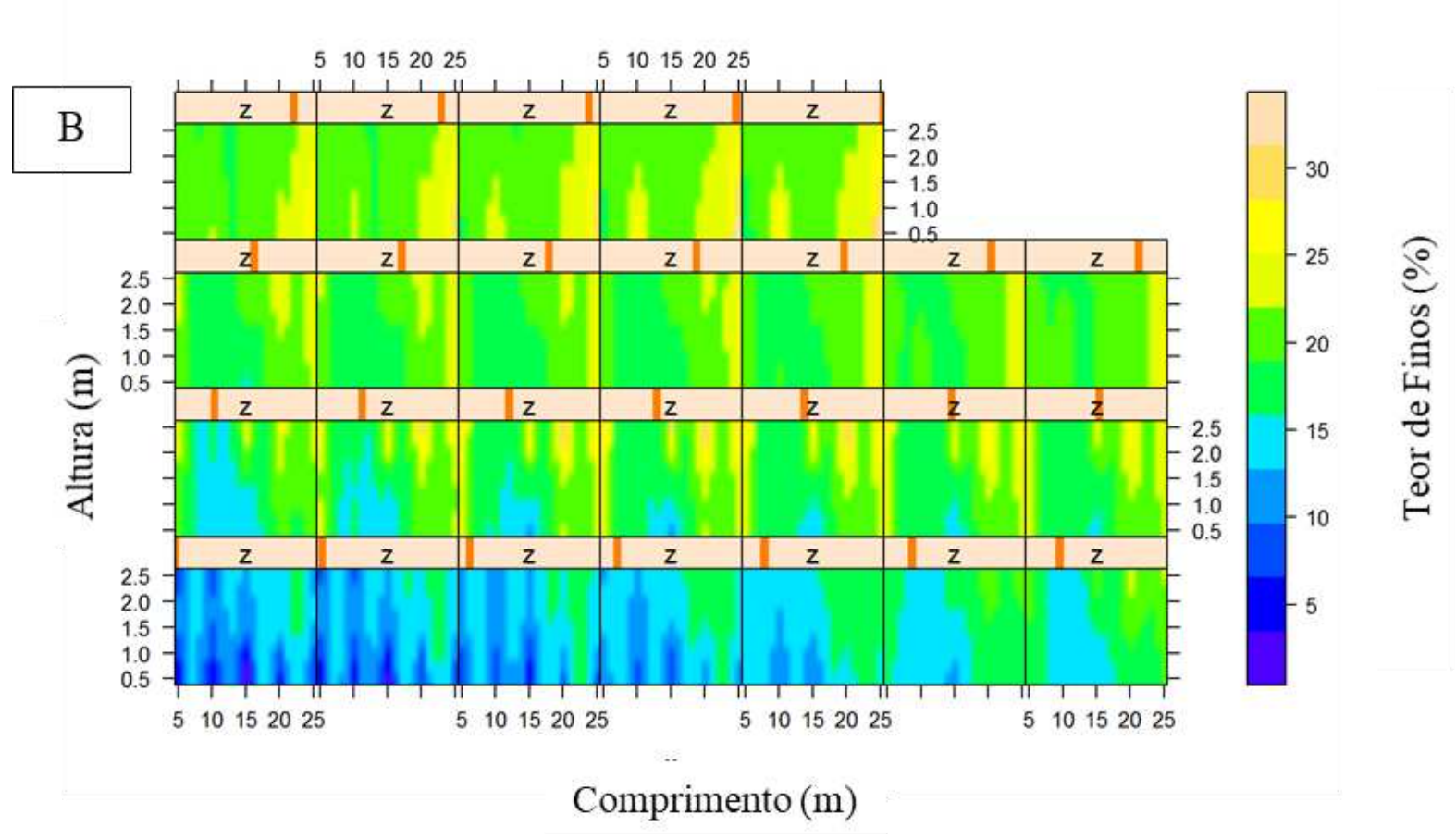


Figura 7 - Distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal para o estoque 2.

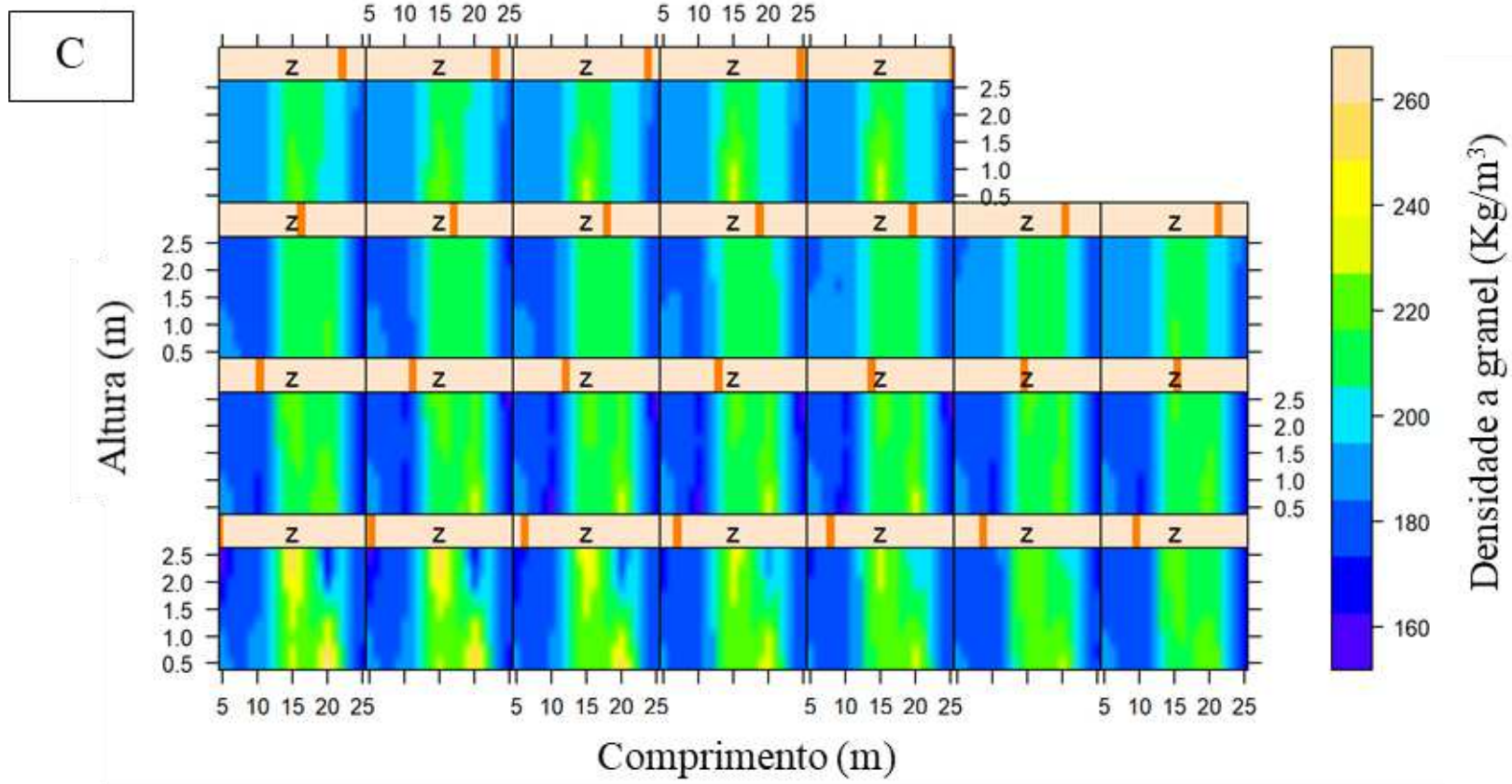


Figura 8 - Distribuição espacial da densidade a granel do carvão vegetal para o estoque 2.

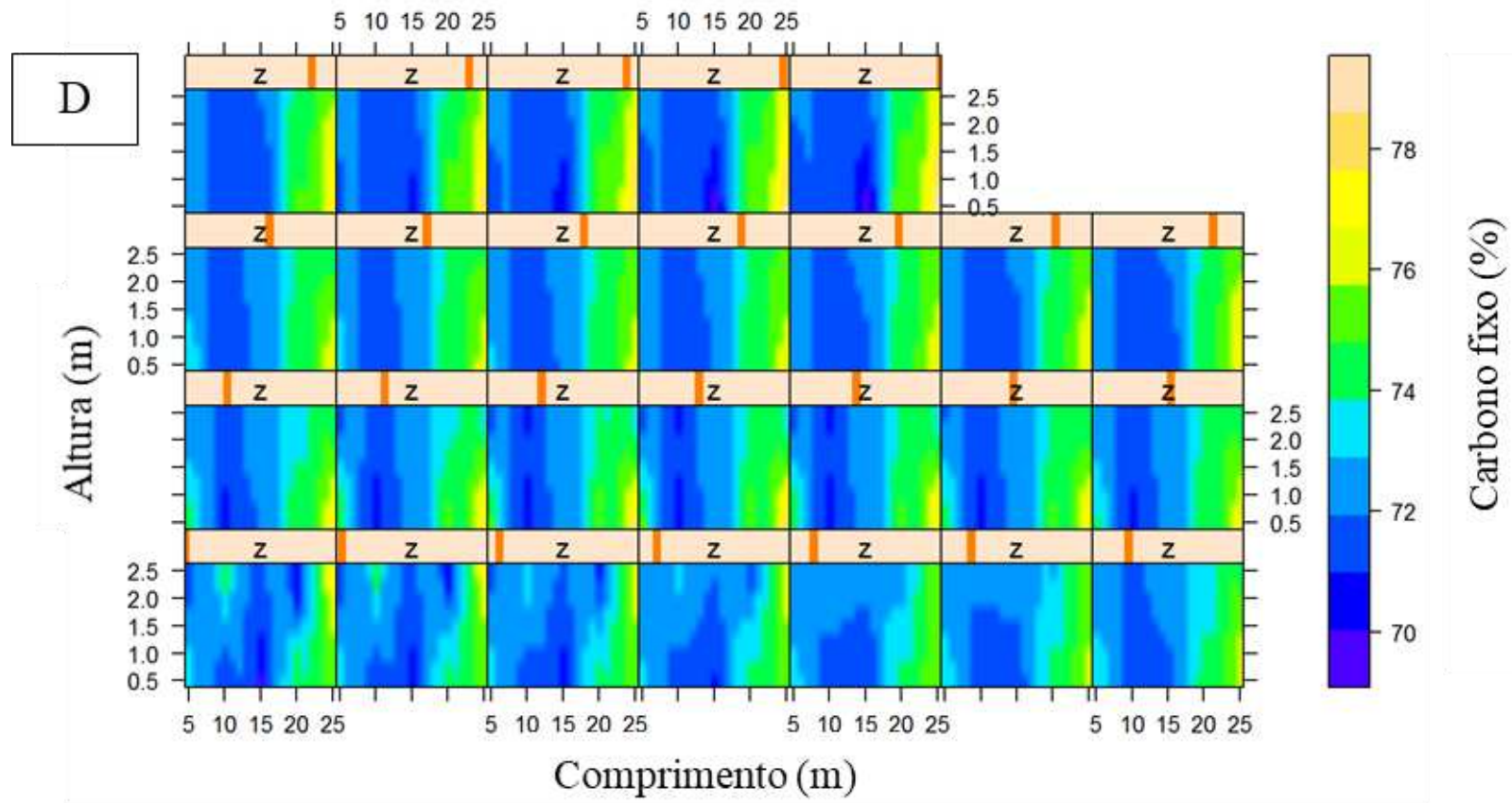


Figura 9 - Distribuição espacial do teor de carbono fixo do carvão vegetal para o estoque 2.

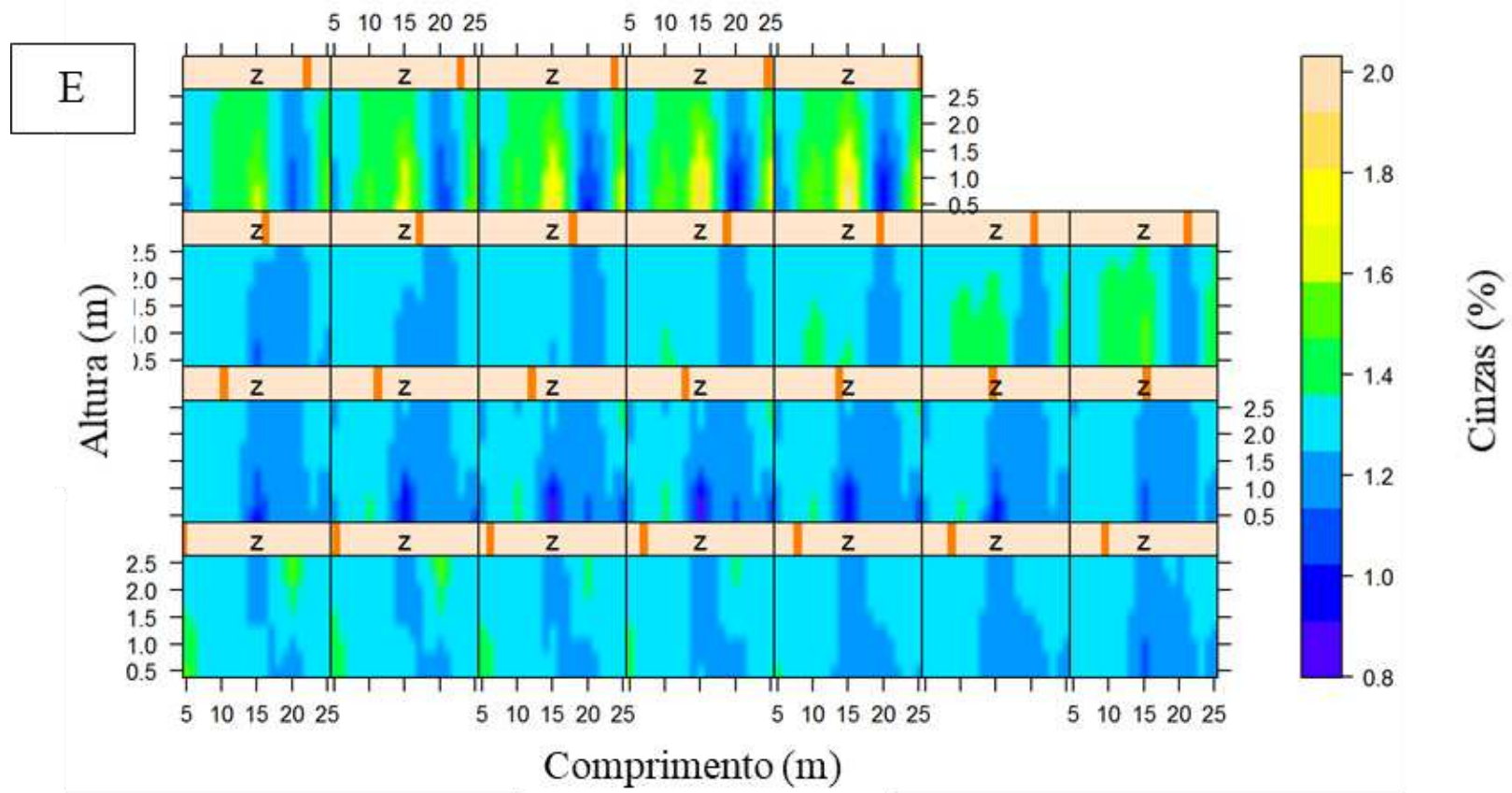


Figura 10 - Distribuição espacial do teor do teor de cinzas do carvão vegetal para o estoque 2.

ANEXO 1C – Estoque 3

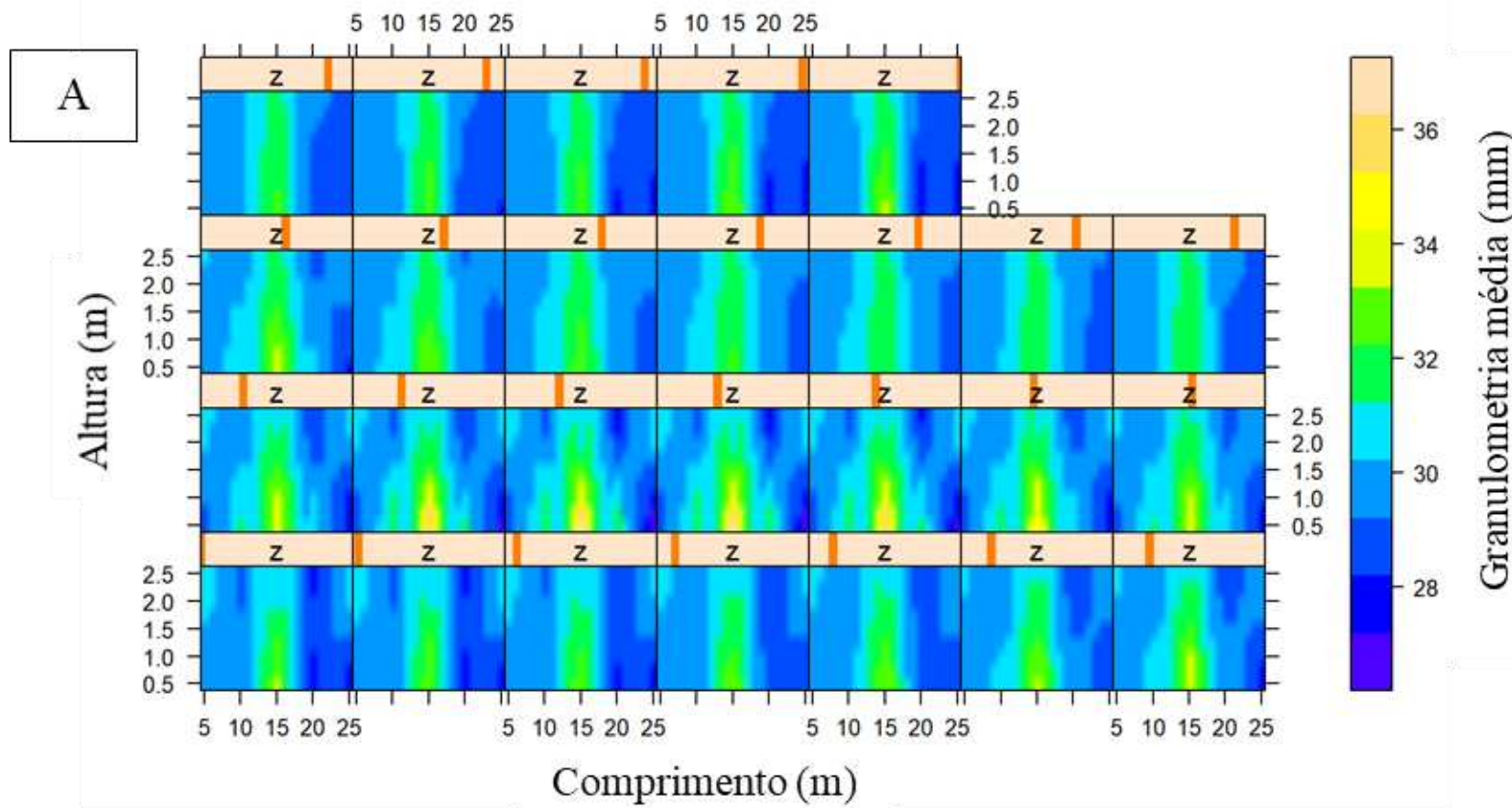


Figura 11 - Distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal para o estoque 3.

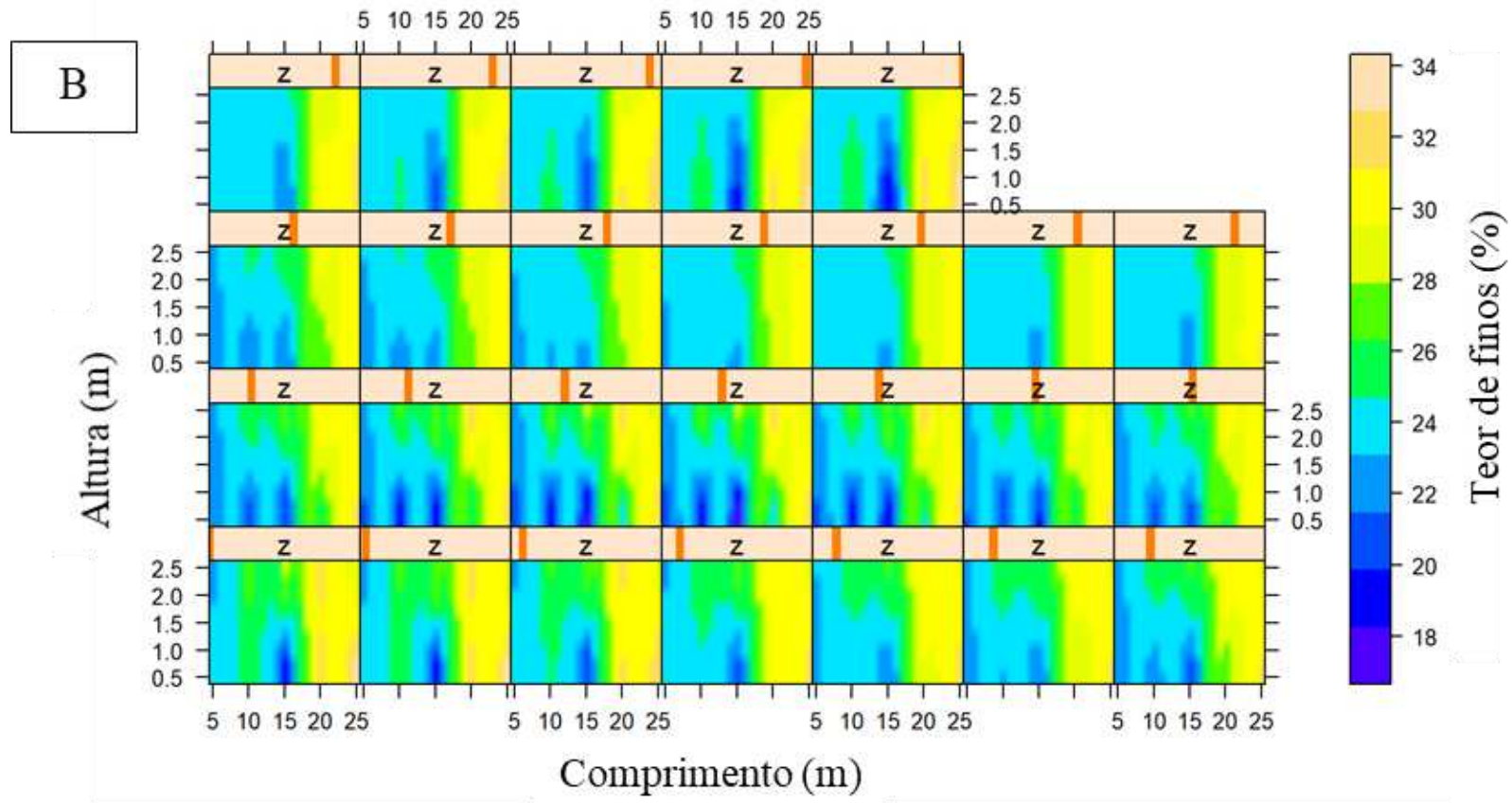


Figura 12 - Distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal para o estoque 3.

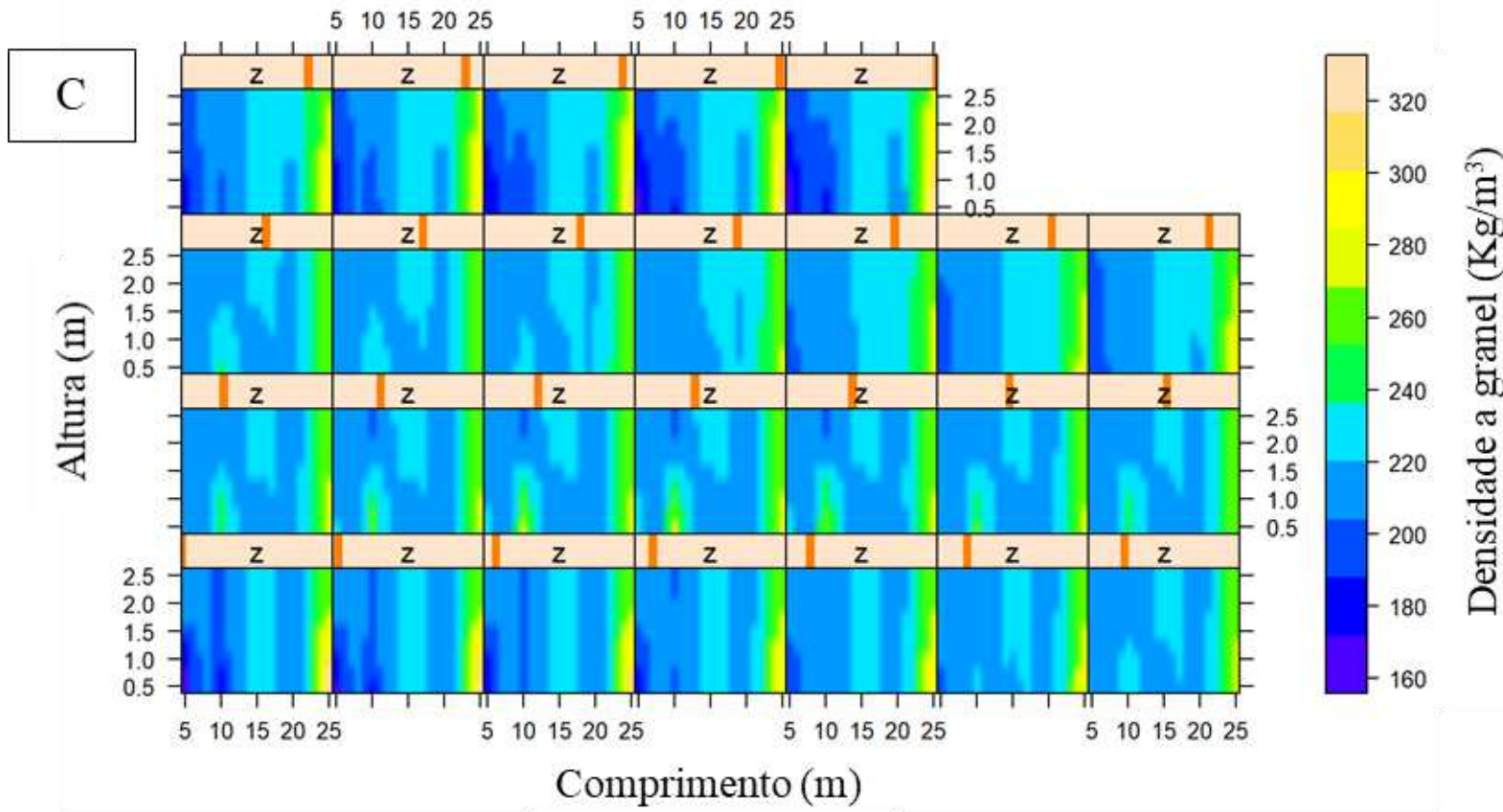


Figura 13 - Distribuição espacial da densidade a granel do carvão vegetal para o estoque 3.

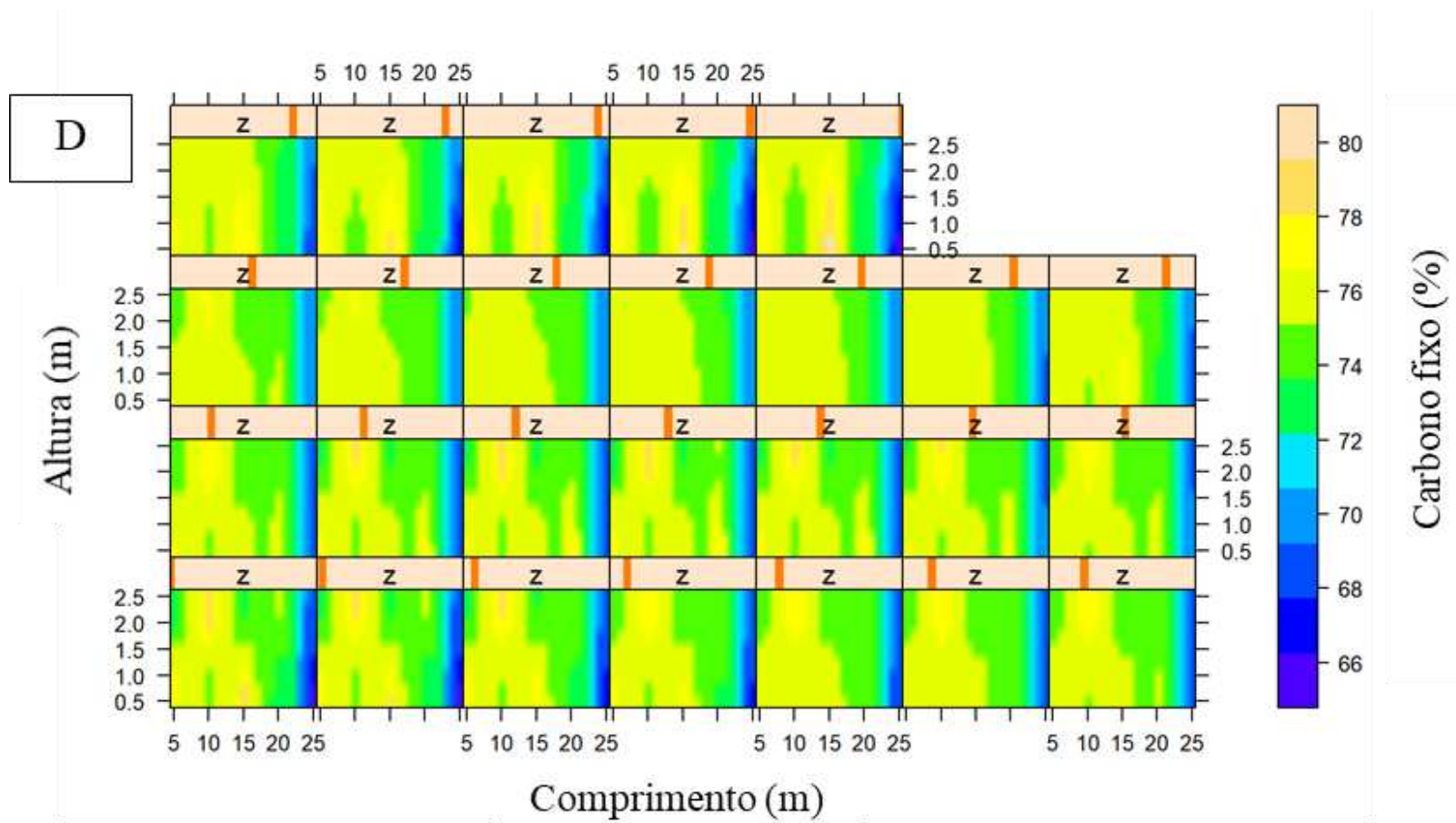


Figura 14 - Distribuição espacial do teor de carbono fixo do carvão vegetal para o estoque 3.

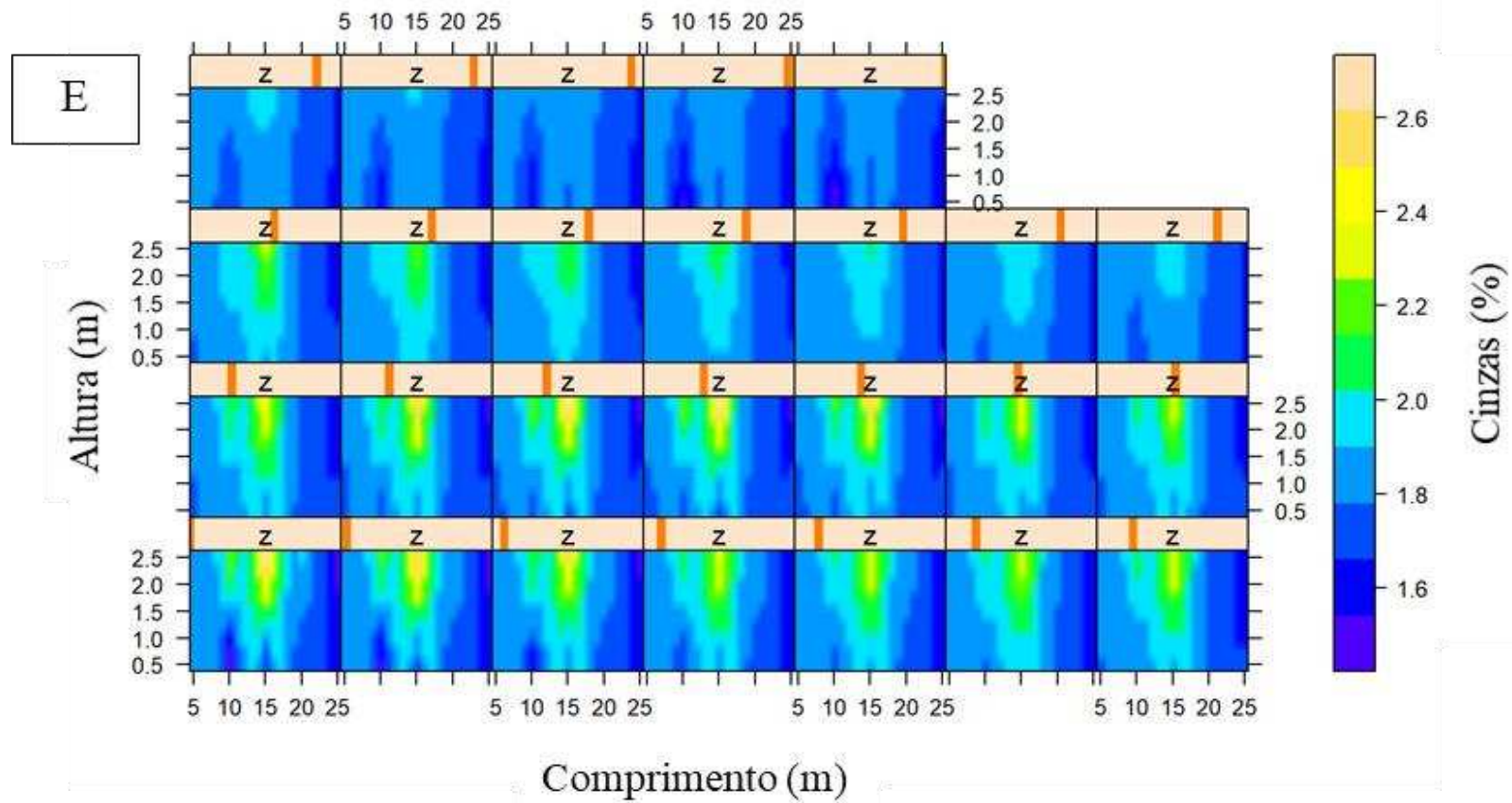


Figura 15 - Distribuição espacial do teor de cinzas do carvão vegetal para o estoque 3.

ANEXO 2 – Distribuição espacial das propriedades do carvão vegetal para o forno RAC

220

ANEXO 2A – Estoque 1

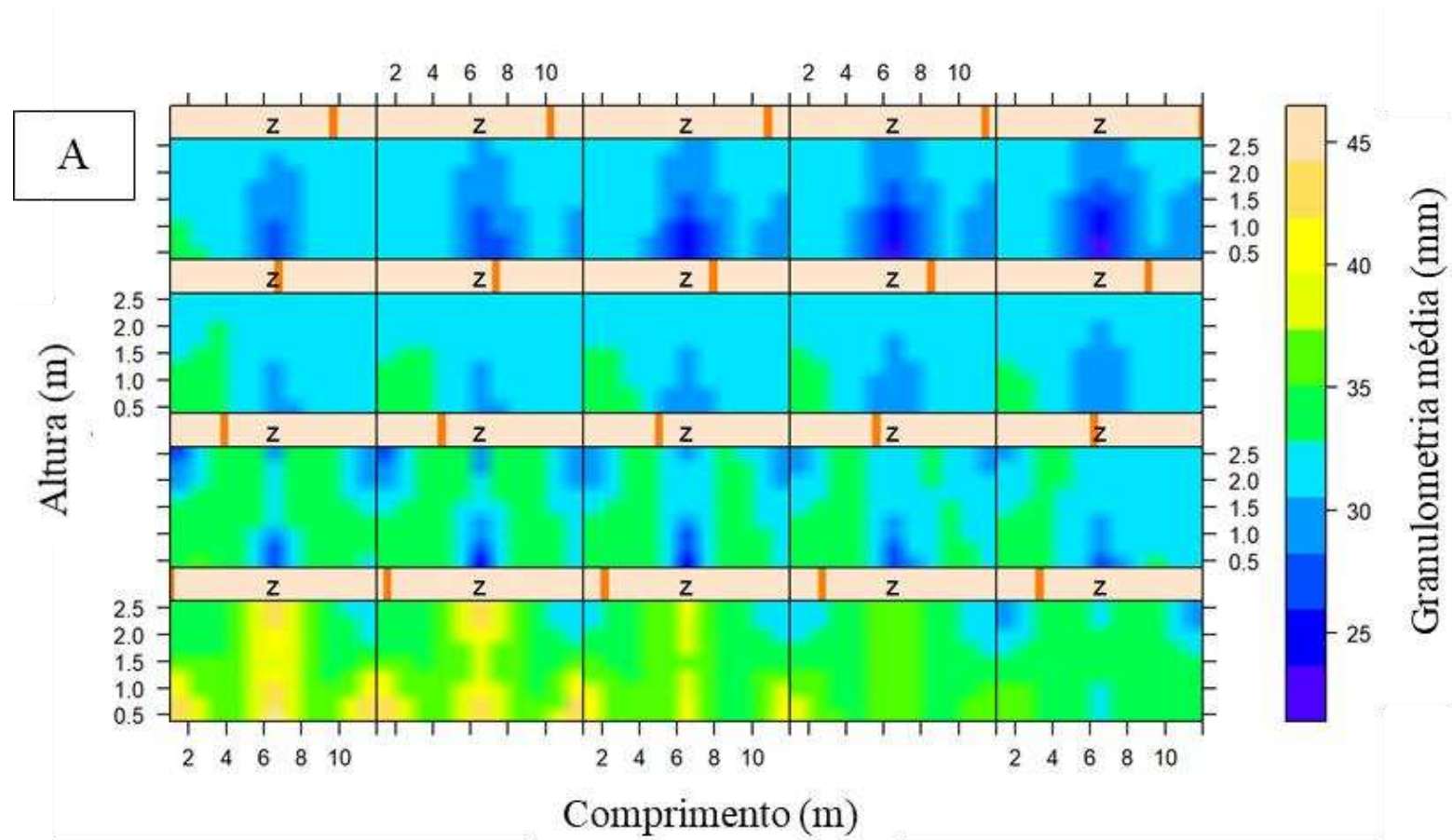


Figura 16 - Distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal para o estoque 1.

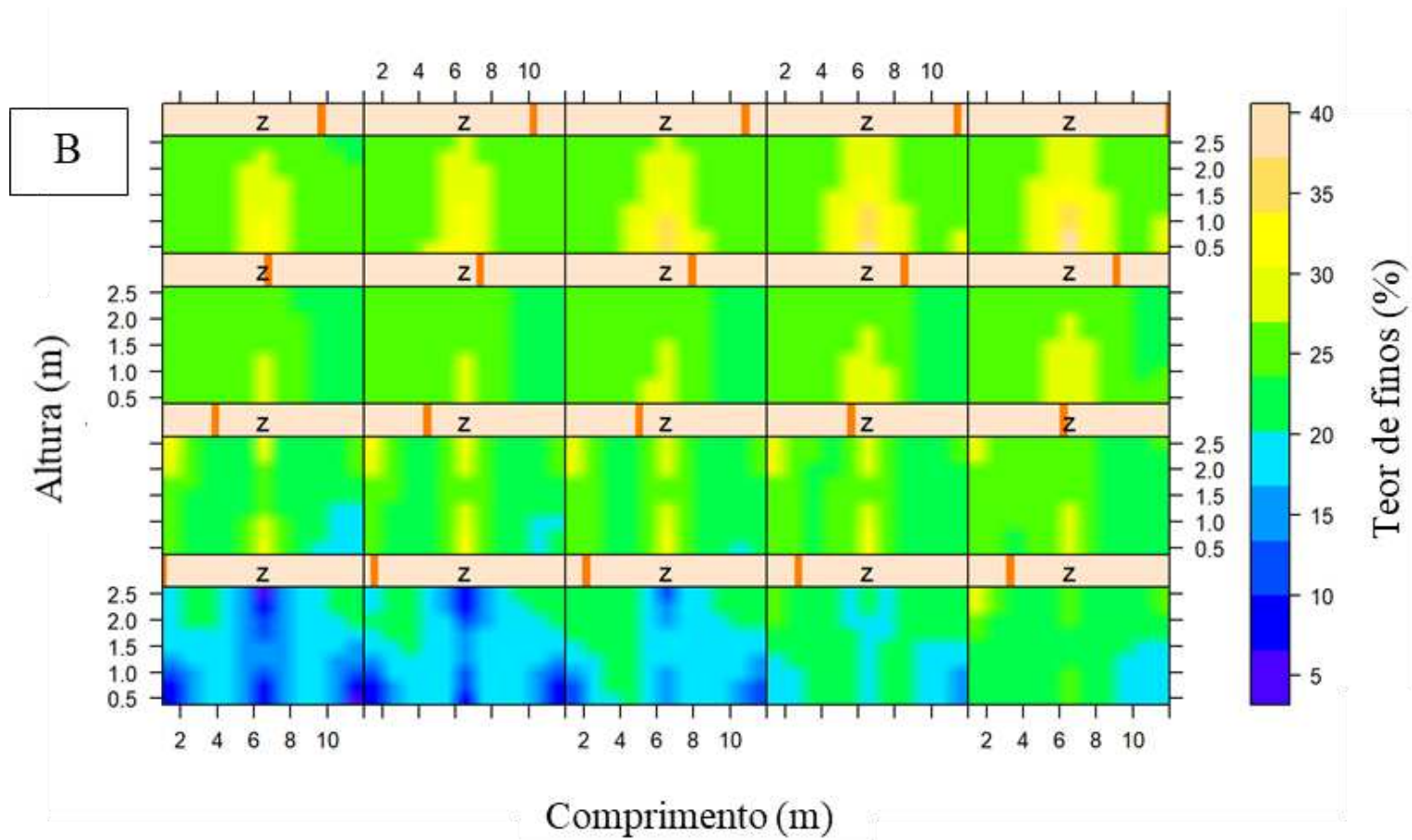


Figura 17 - Distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal para o estoque 1.

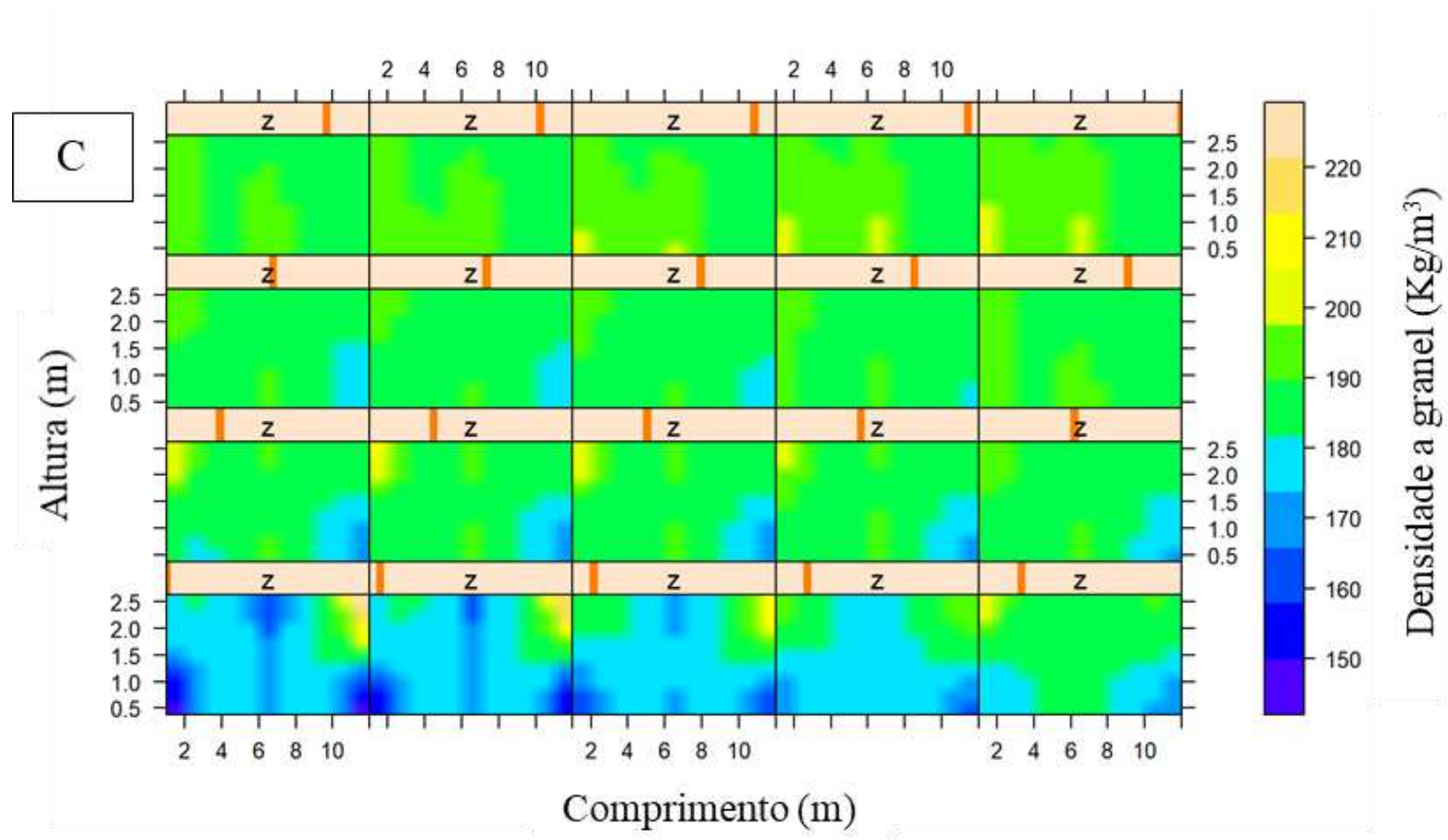


Figura 18 - Distribuição espacial da densidade a granel do carvão vegetal para o estoque 1.

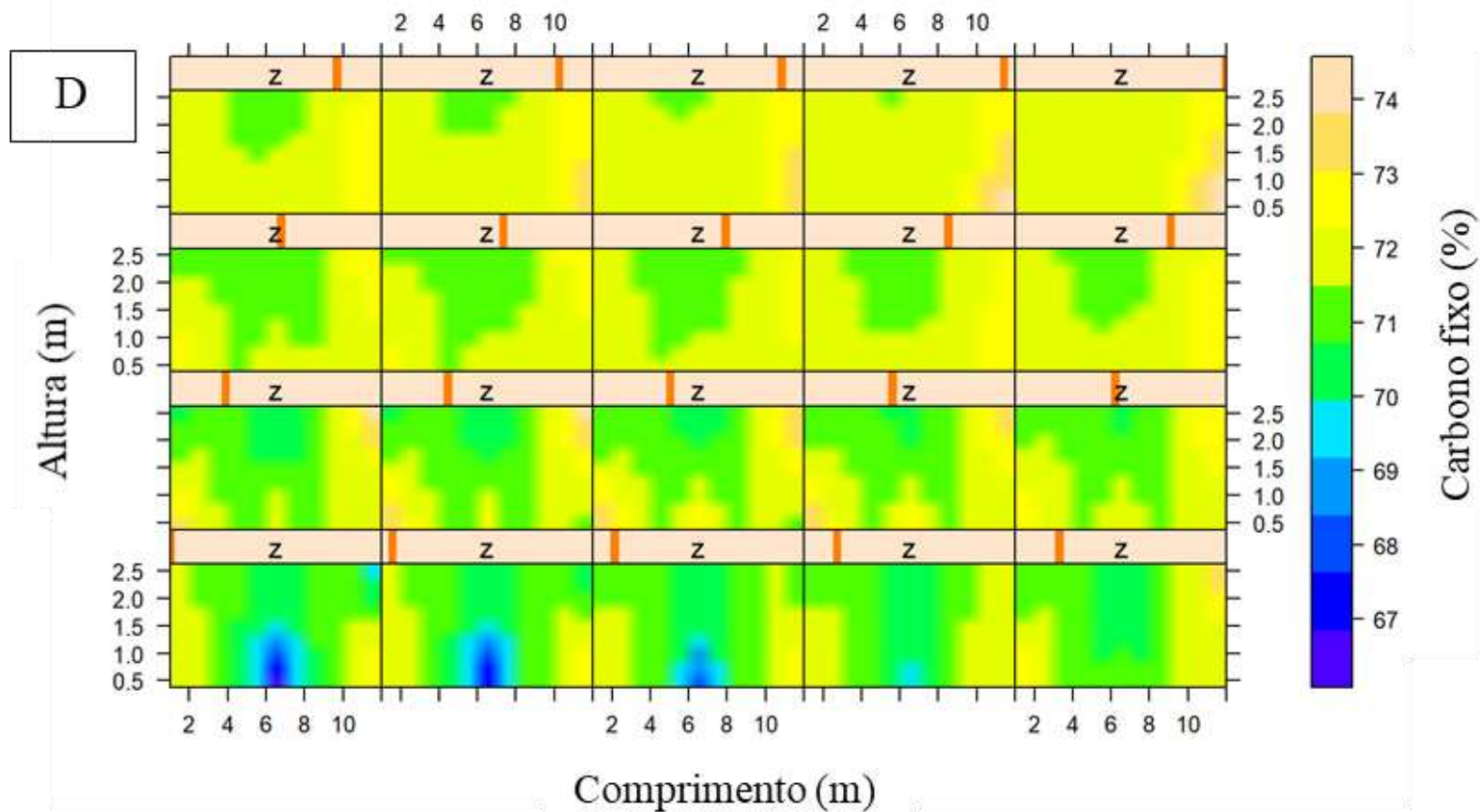


Figura 19 - Distribuição espacial do teor de carbono fixo do carvão vegetal para o estoque 1.

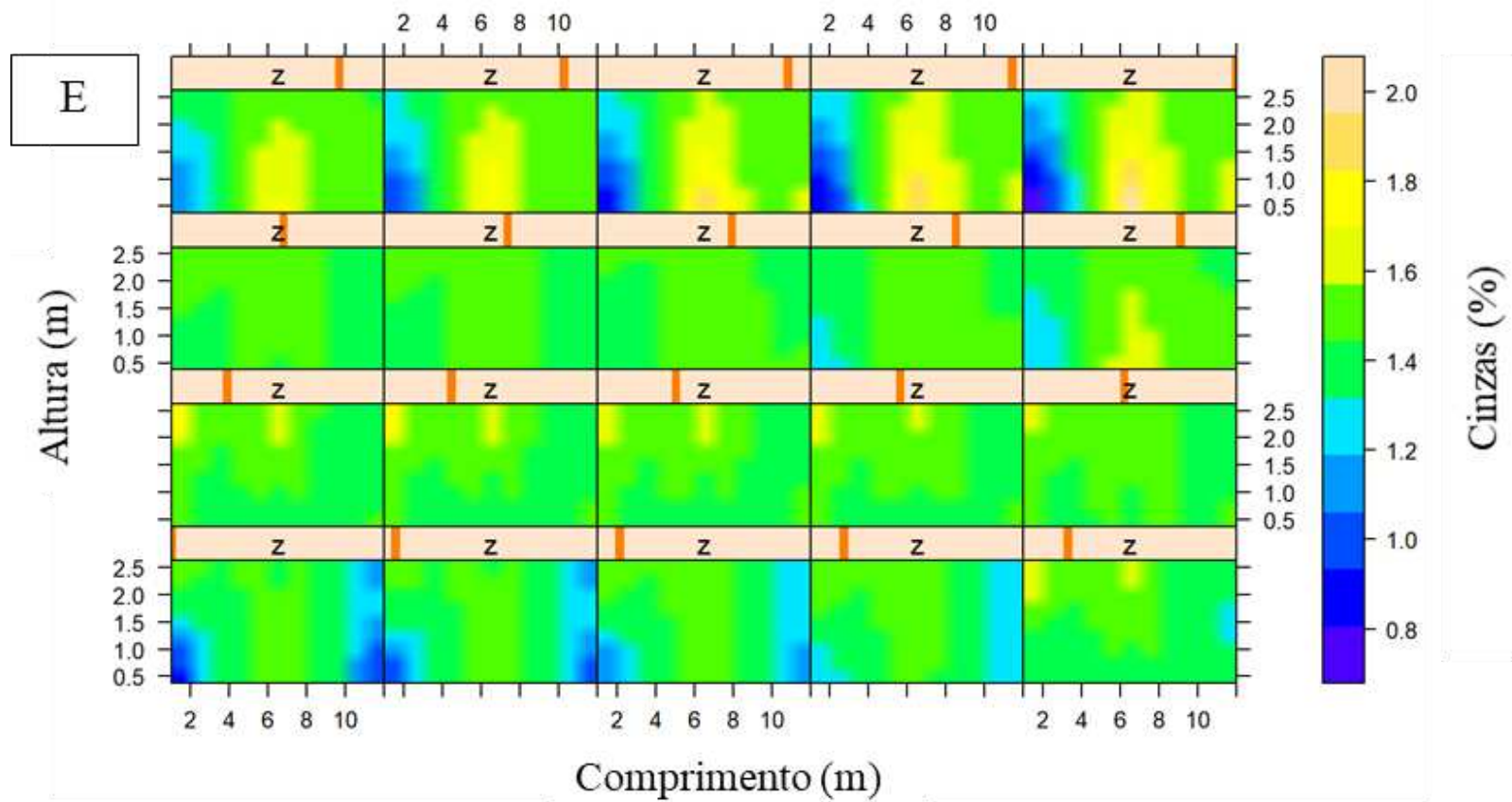


Figura 20 - Distribuição espacial do teor de cinzas do carvão vegetal para o estoque 1.

ANEXO 2B – Estoque 2

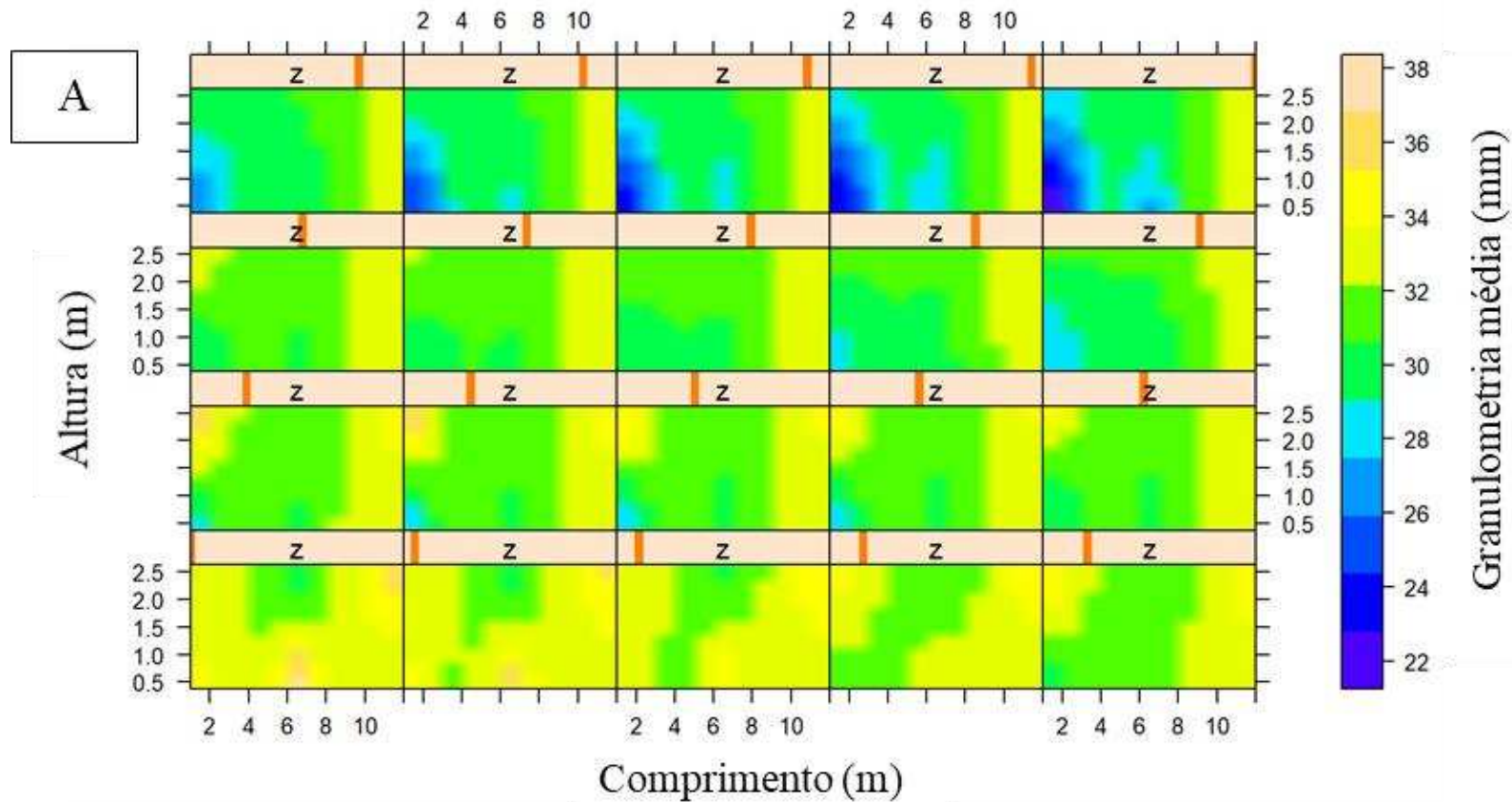


Figura 21 - Distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal para o estoque 2.

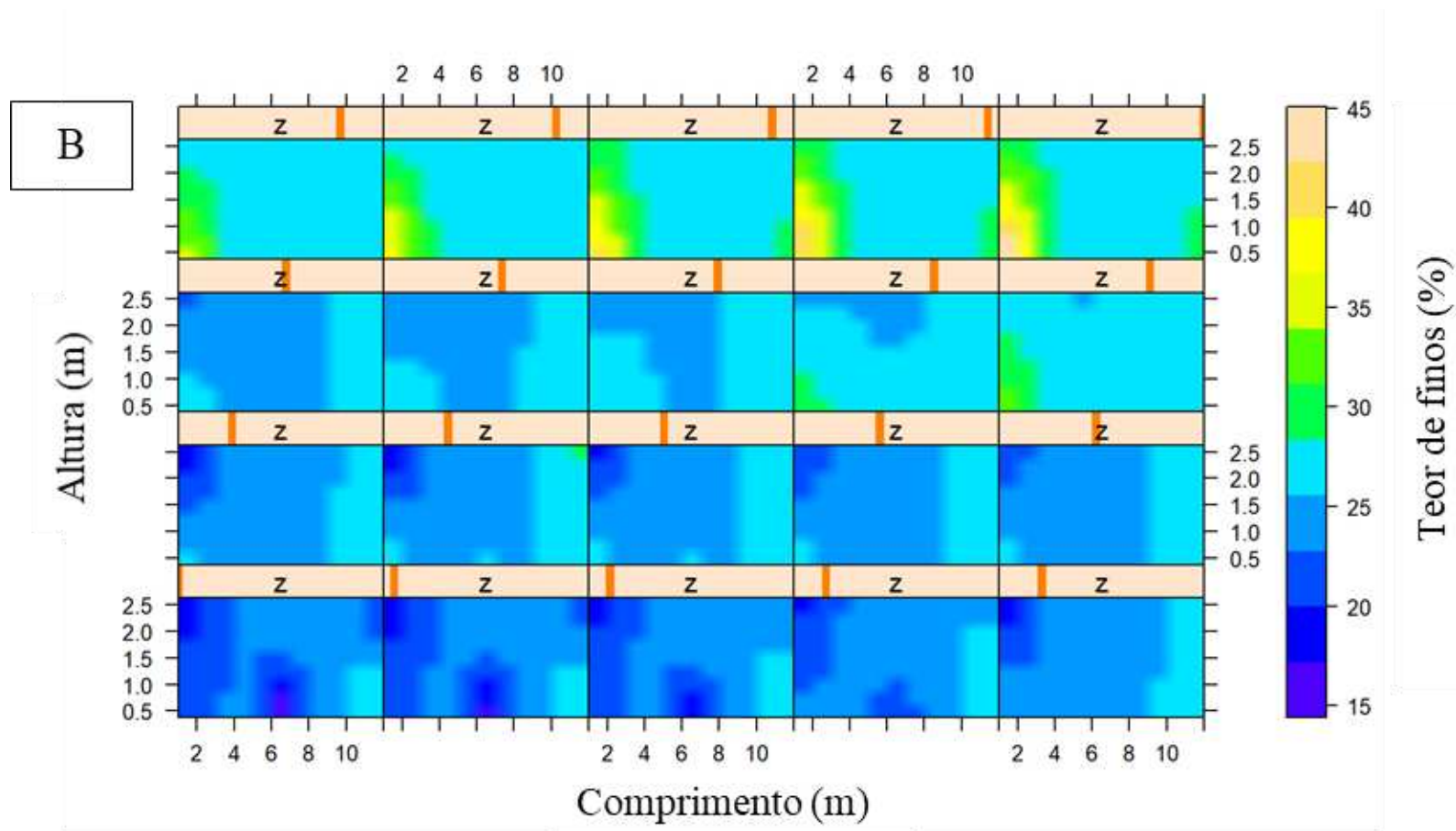


Figura 22 - Distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal para o estoque 2.

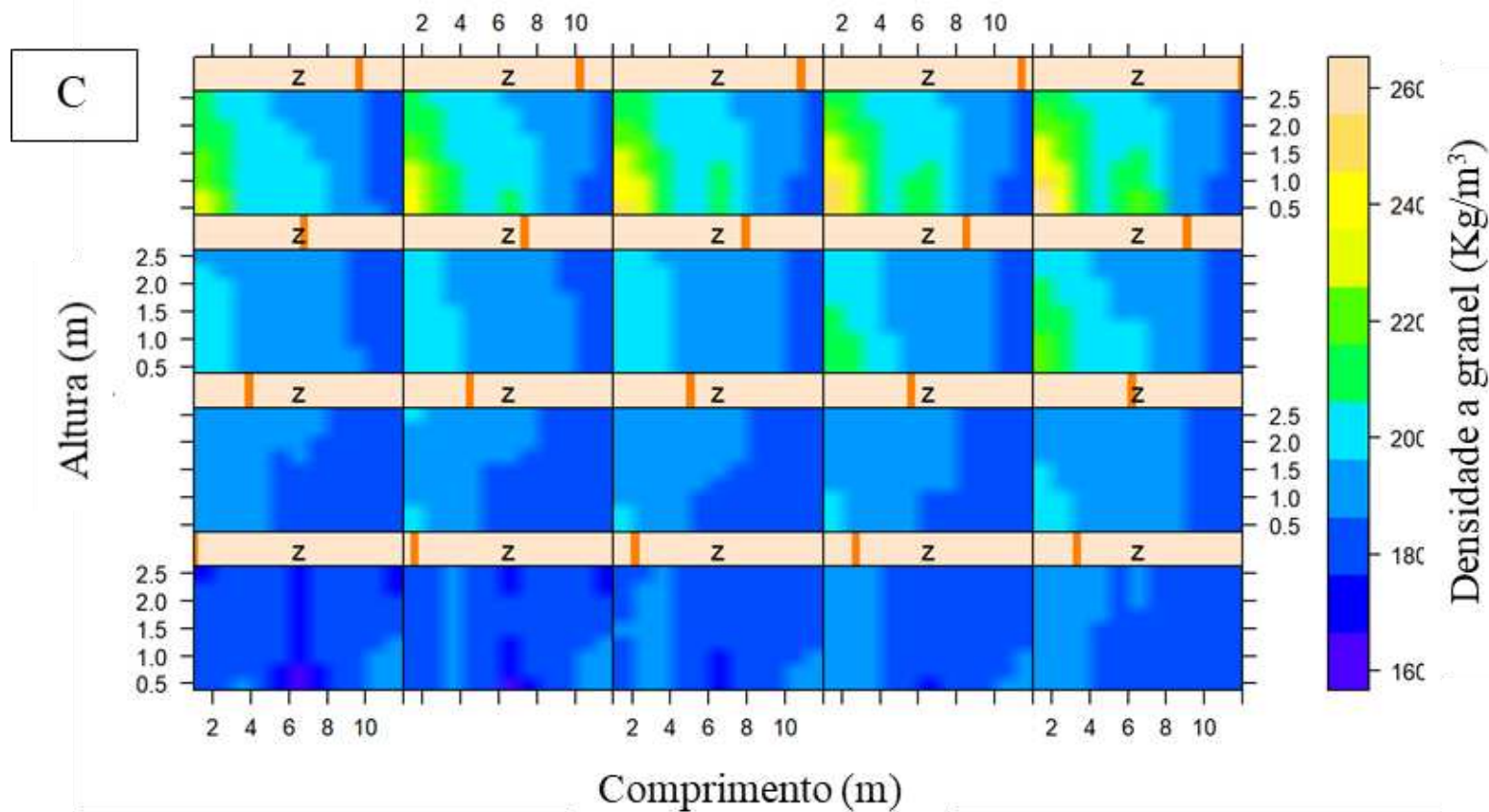


Figura 23 - Distribuição espacial da densidade a granel do carvão vegetal para o estoque 2.

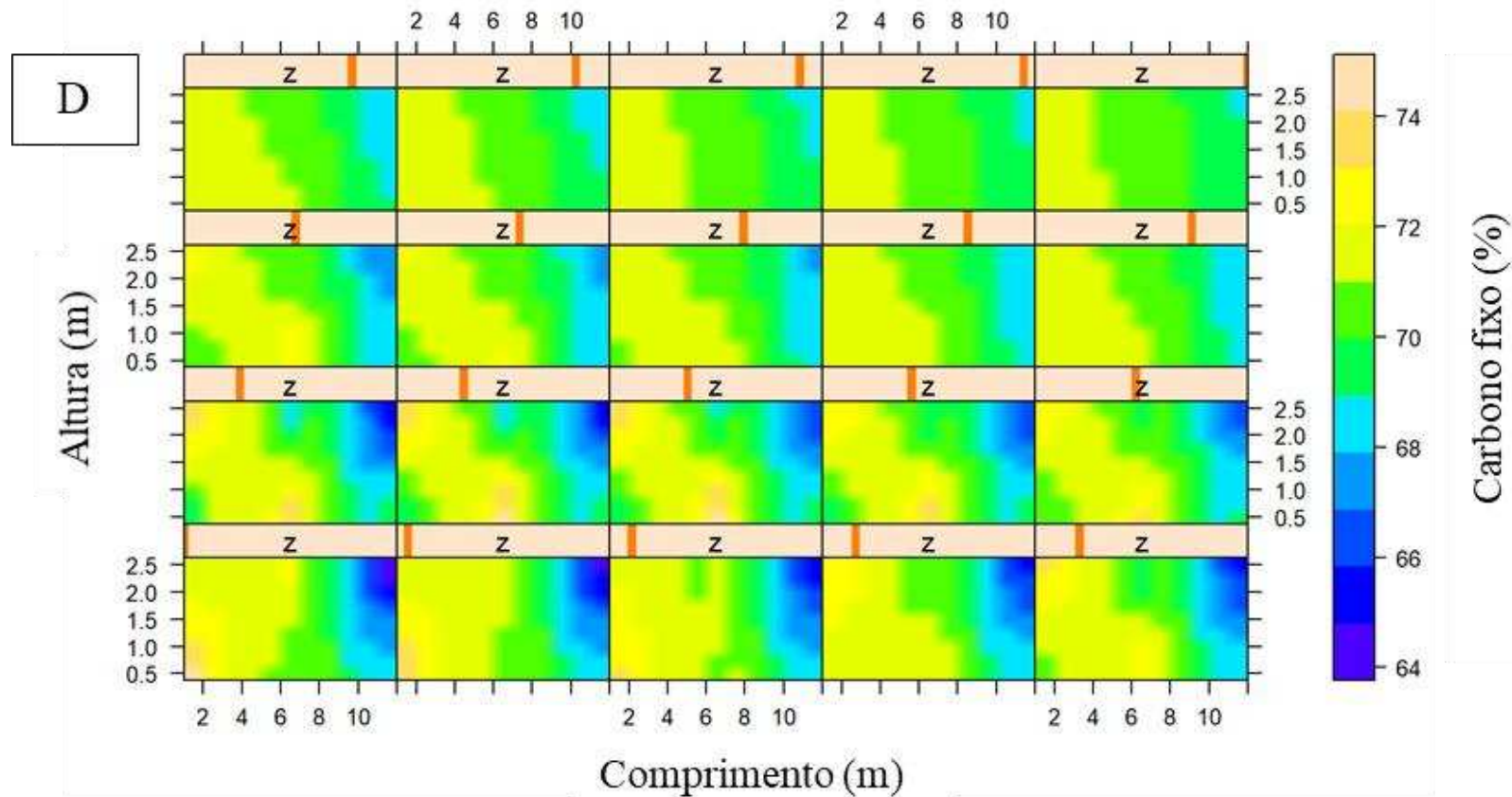


Figura 24 - Distribuição espacial do teor de carbono fixo do carvão vegetal para o estoque 2.

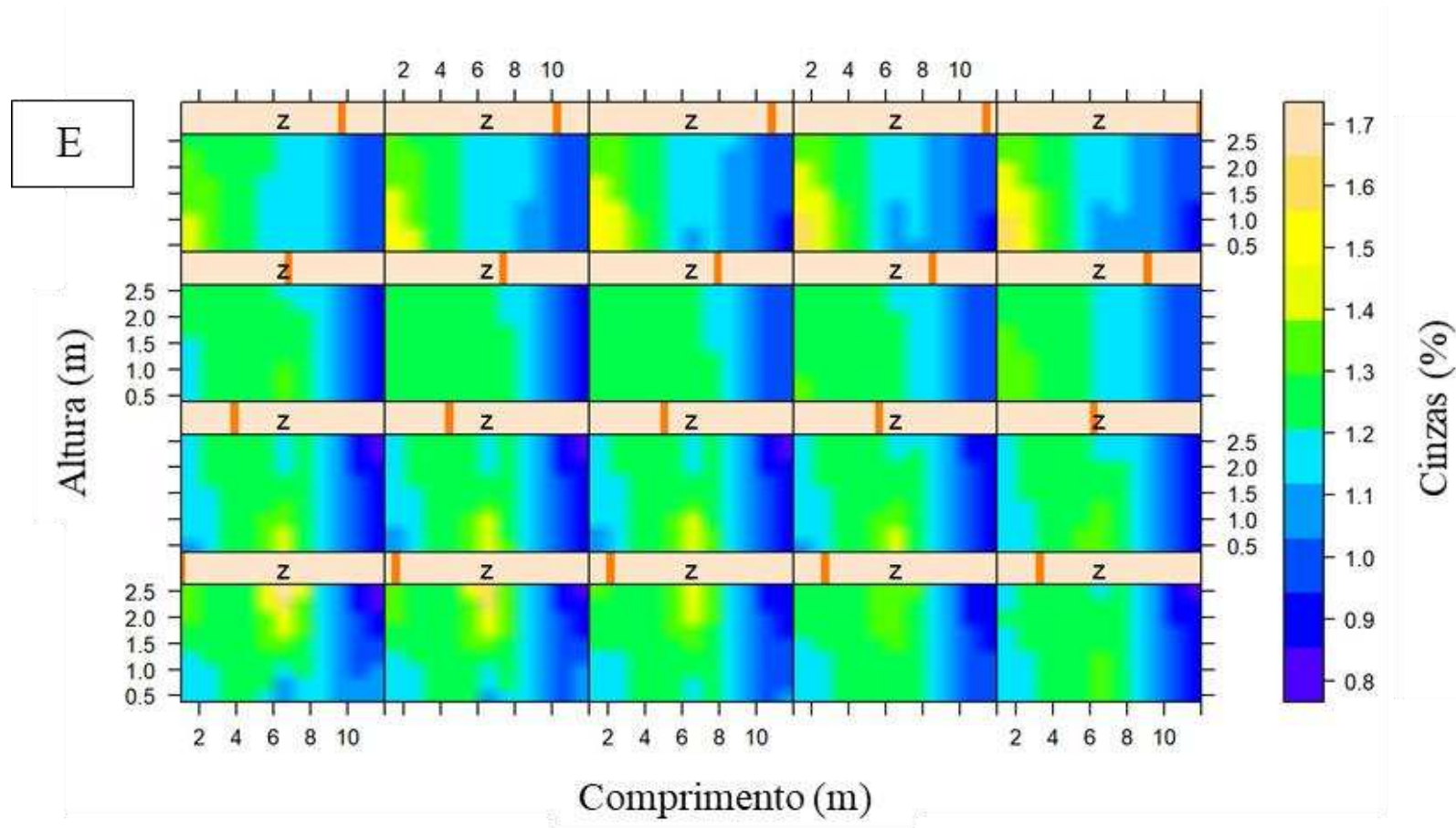


Figura 25 - Distribuição espacial do teor de cinzas do carvão vegetal para o estoque 2.

ANEXO 2C – Estoque 3

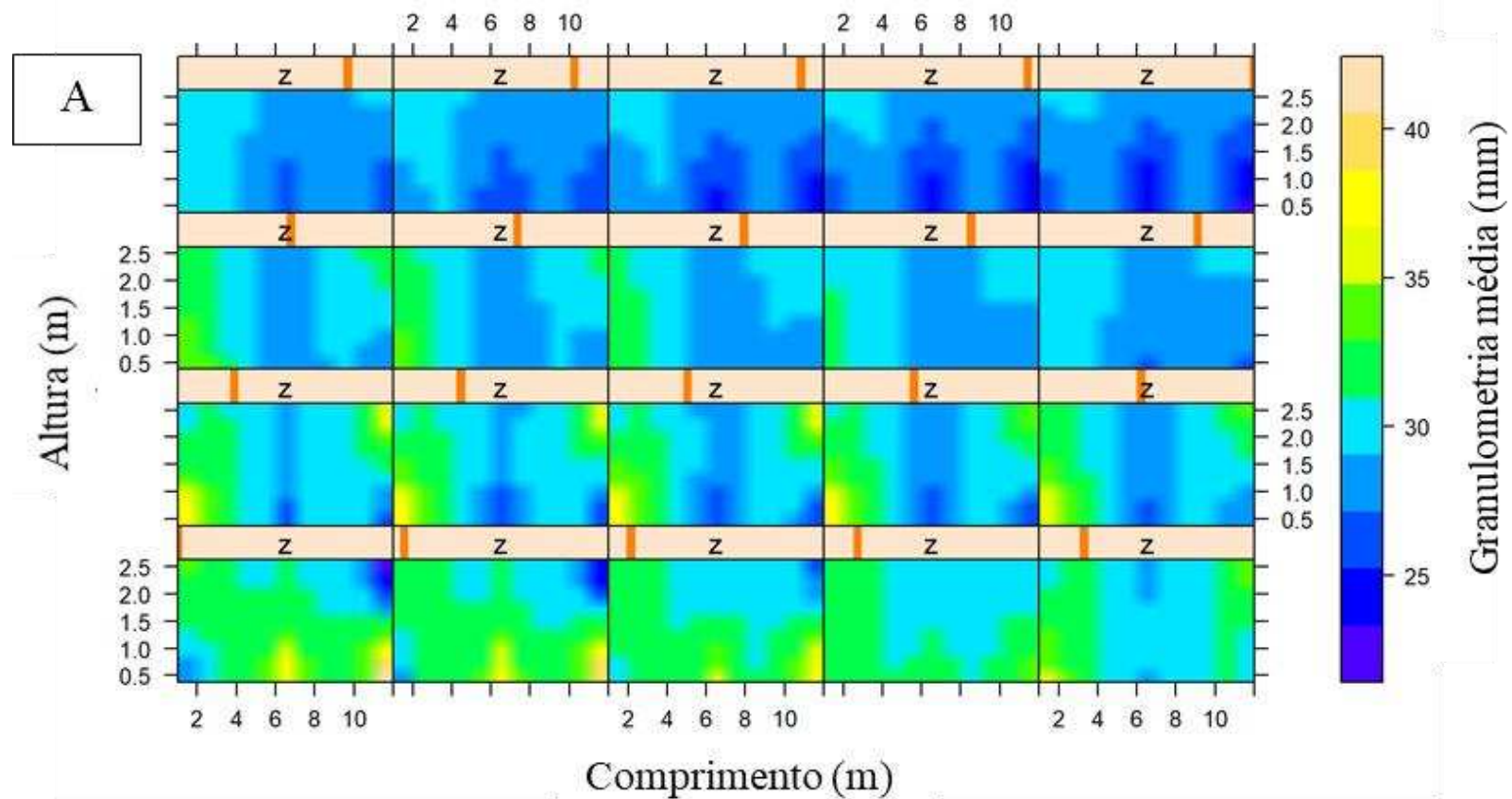


Figura 26 - Distribuição espacial da granulometria média do carvão vegetal para o estoque 3.

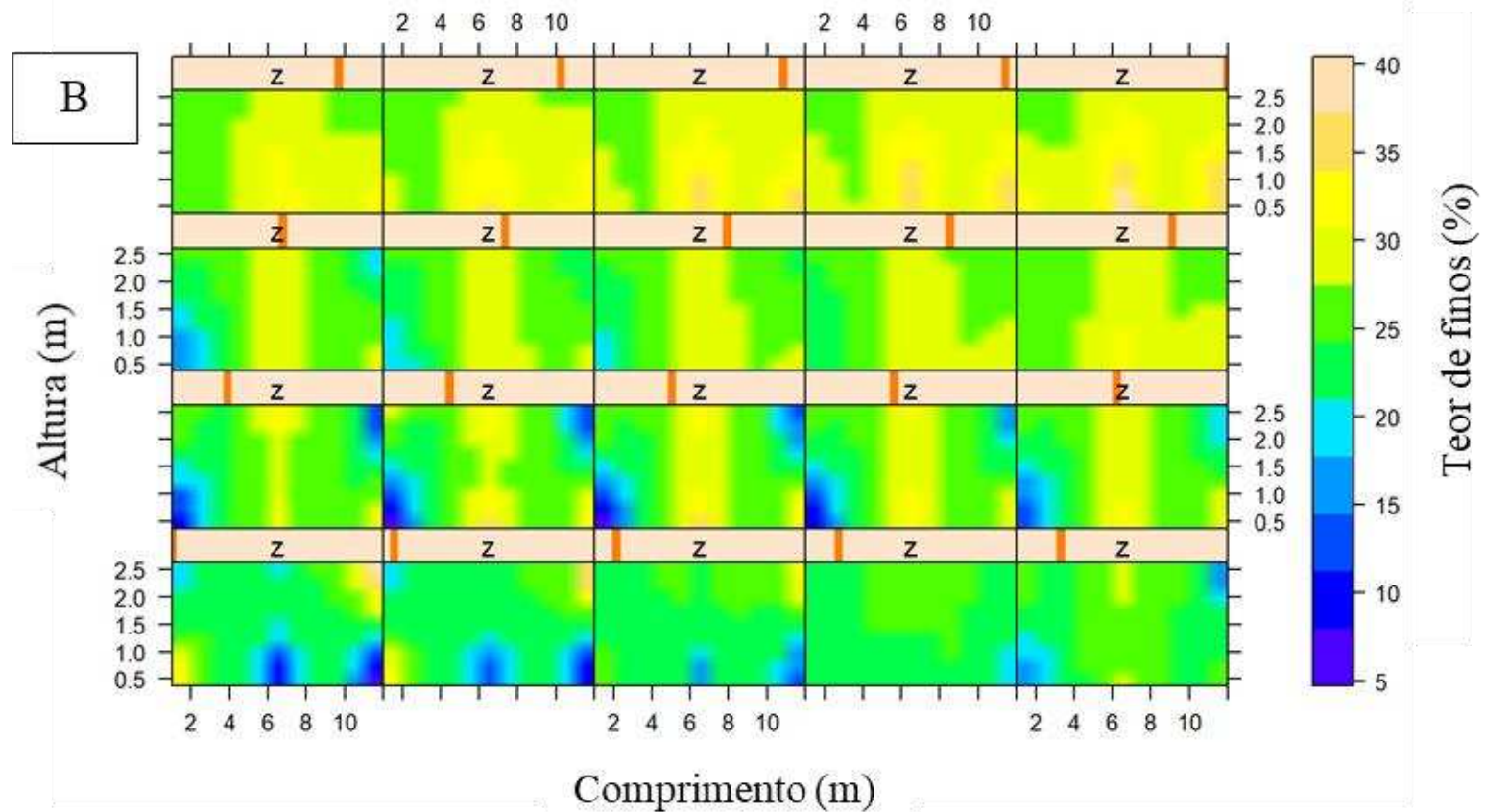


Figura 27 - Distribuição espacial do teor de finos do carvão vegetal para o estoque 3.

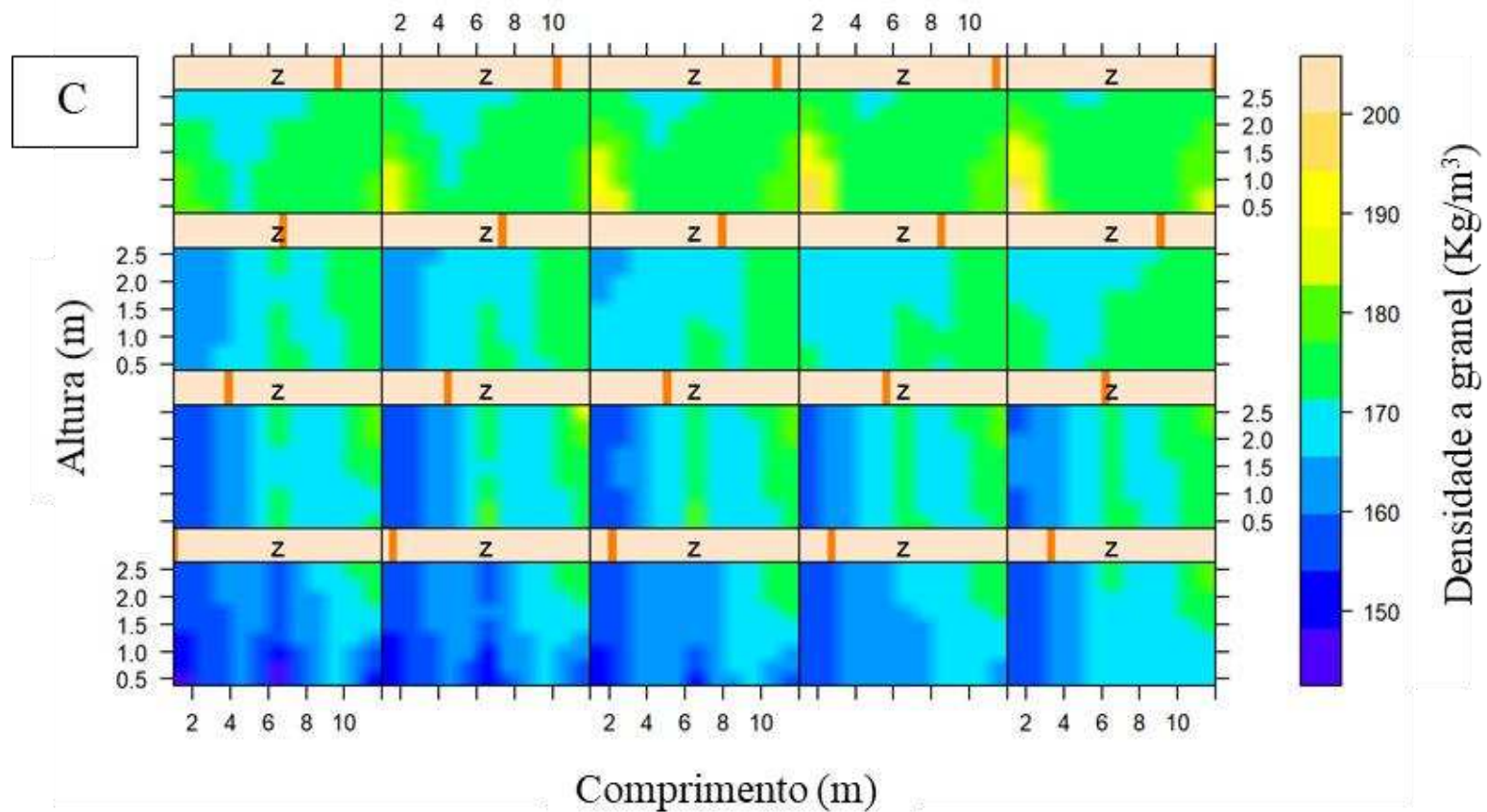


Figura 28 - Distribuição espacial da densidade a granel do carvão vegetal para o estoque 3.

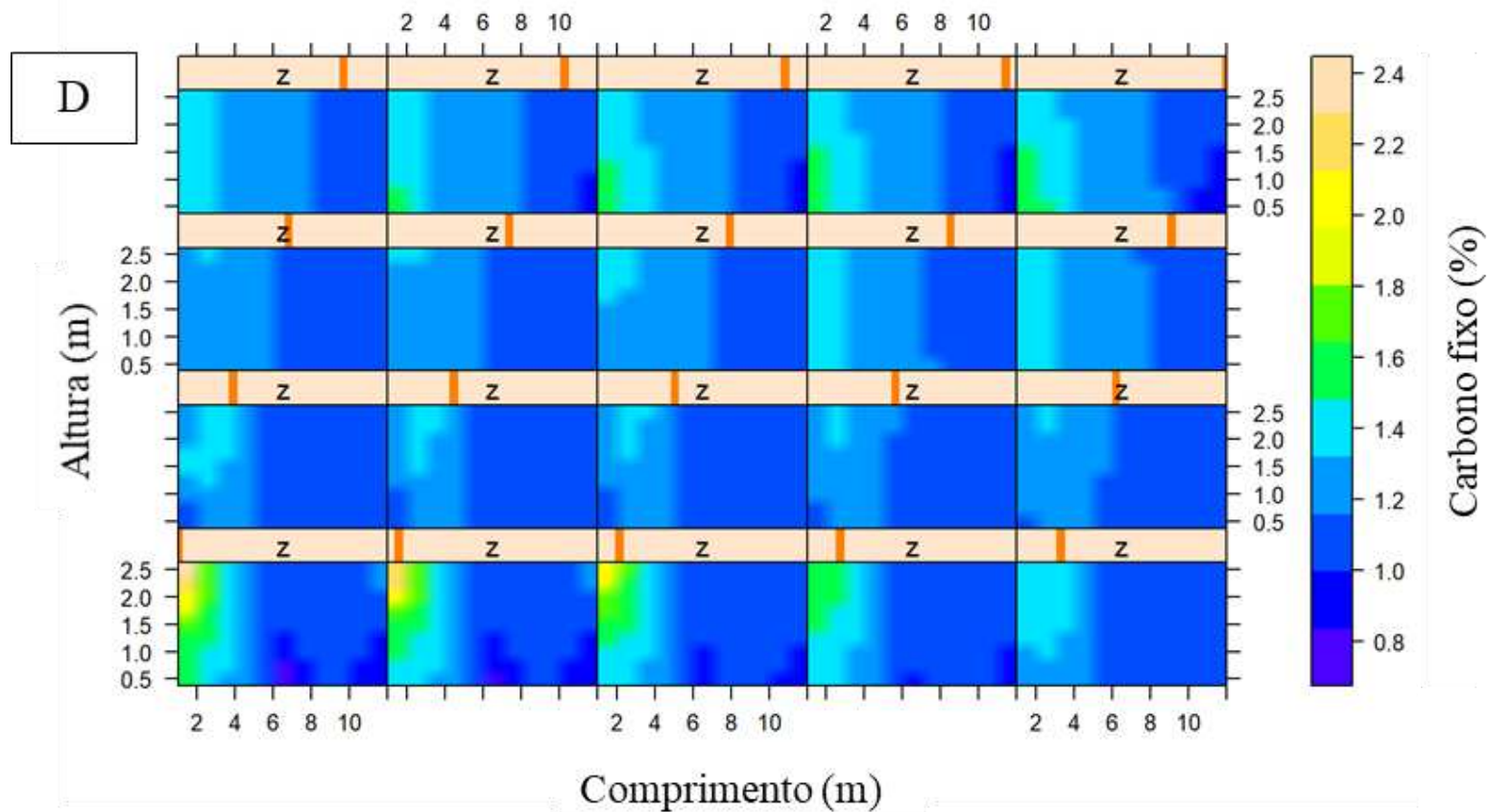


Figura 29 - Distribuição espacial do teor de carbono fixo do carvão vegetal para o estoque 3.

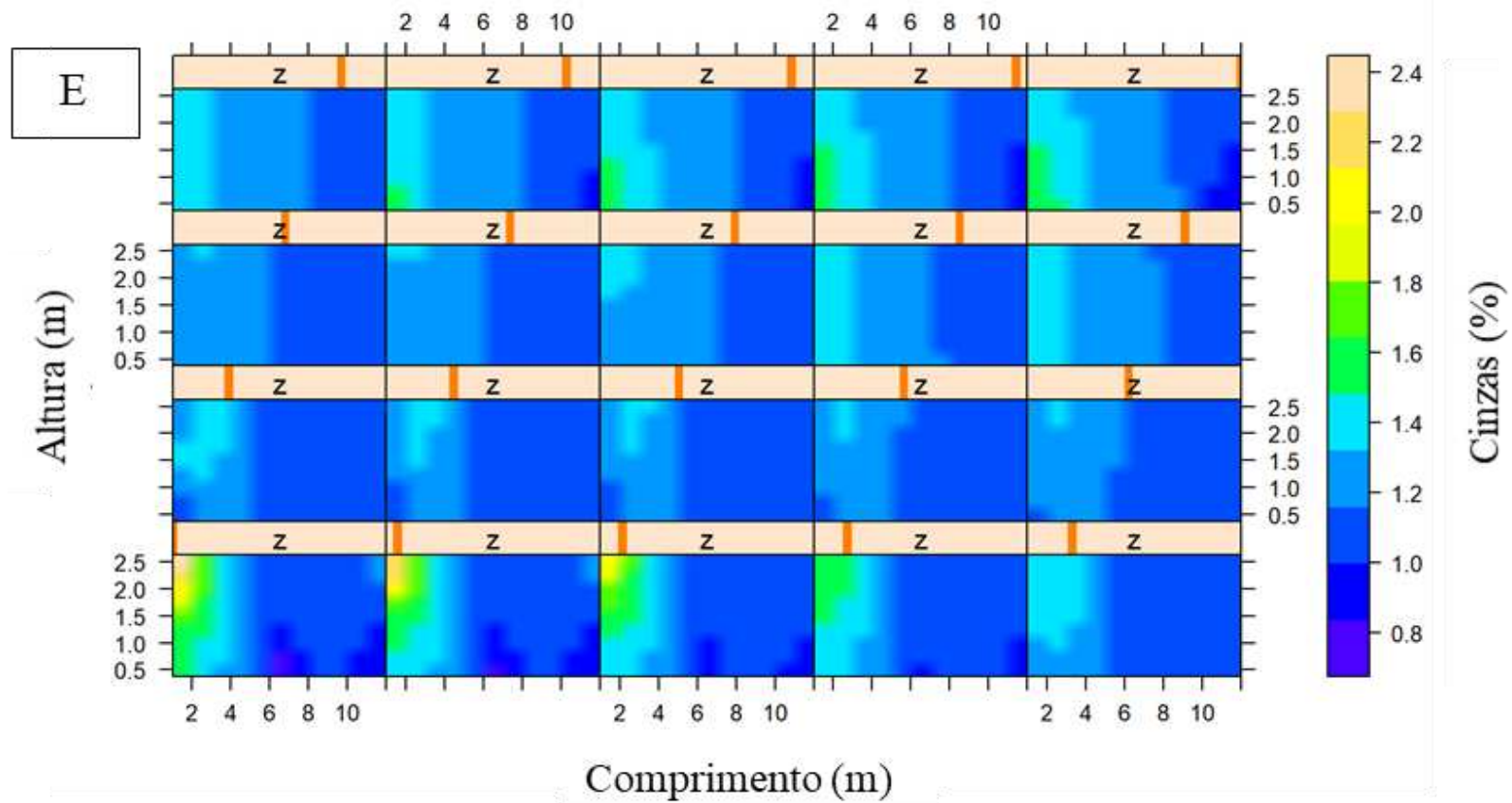


Figura 30 - Distribuição espacial do teor de cinzas do carvão vegetal para o estoque 3.

ANEXO 3 – Vetores das propriedades do carvão vegetal para a análise de componentes principais

ANEXO 3A – RAC 700

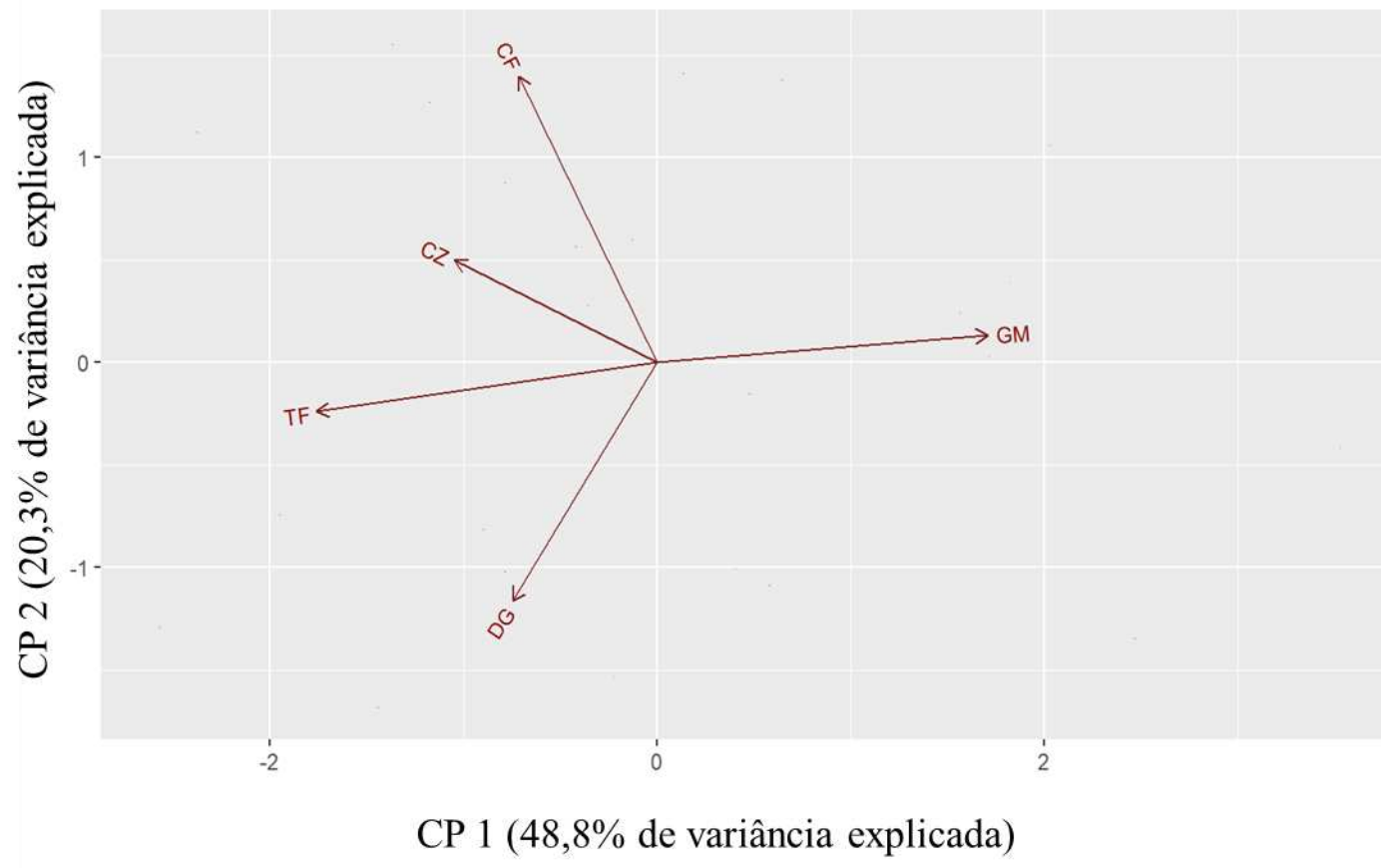


Figura 31 - Vetores das propriedades do carvão vegetal em relação aos componentes principais 1 e 2 para o estoque 1.

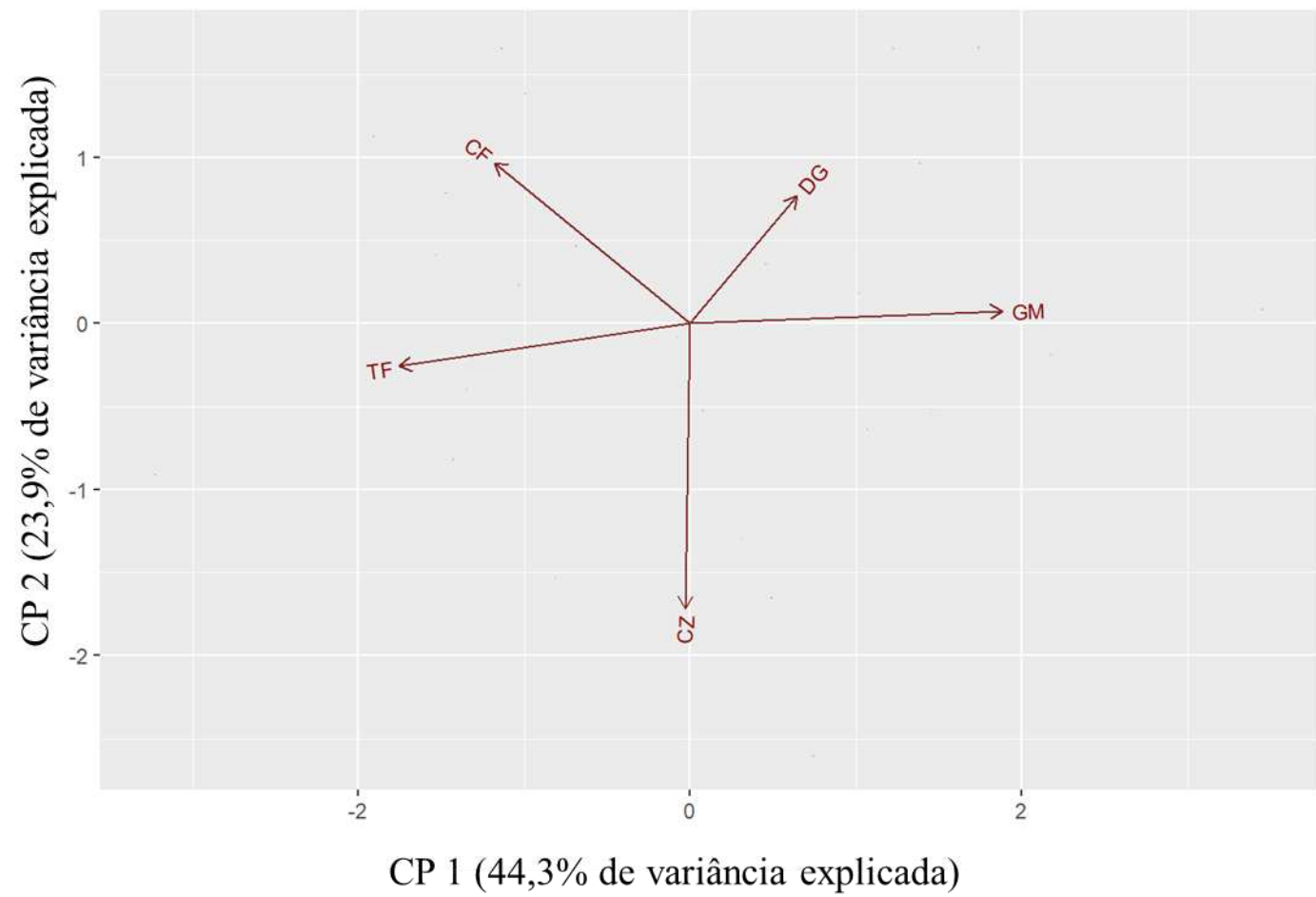


Figura 32 - Vetores das propriedades do carvão vegetal em relação aos componentes principais 1 e 2 para o estoque 2.

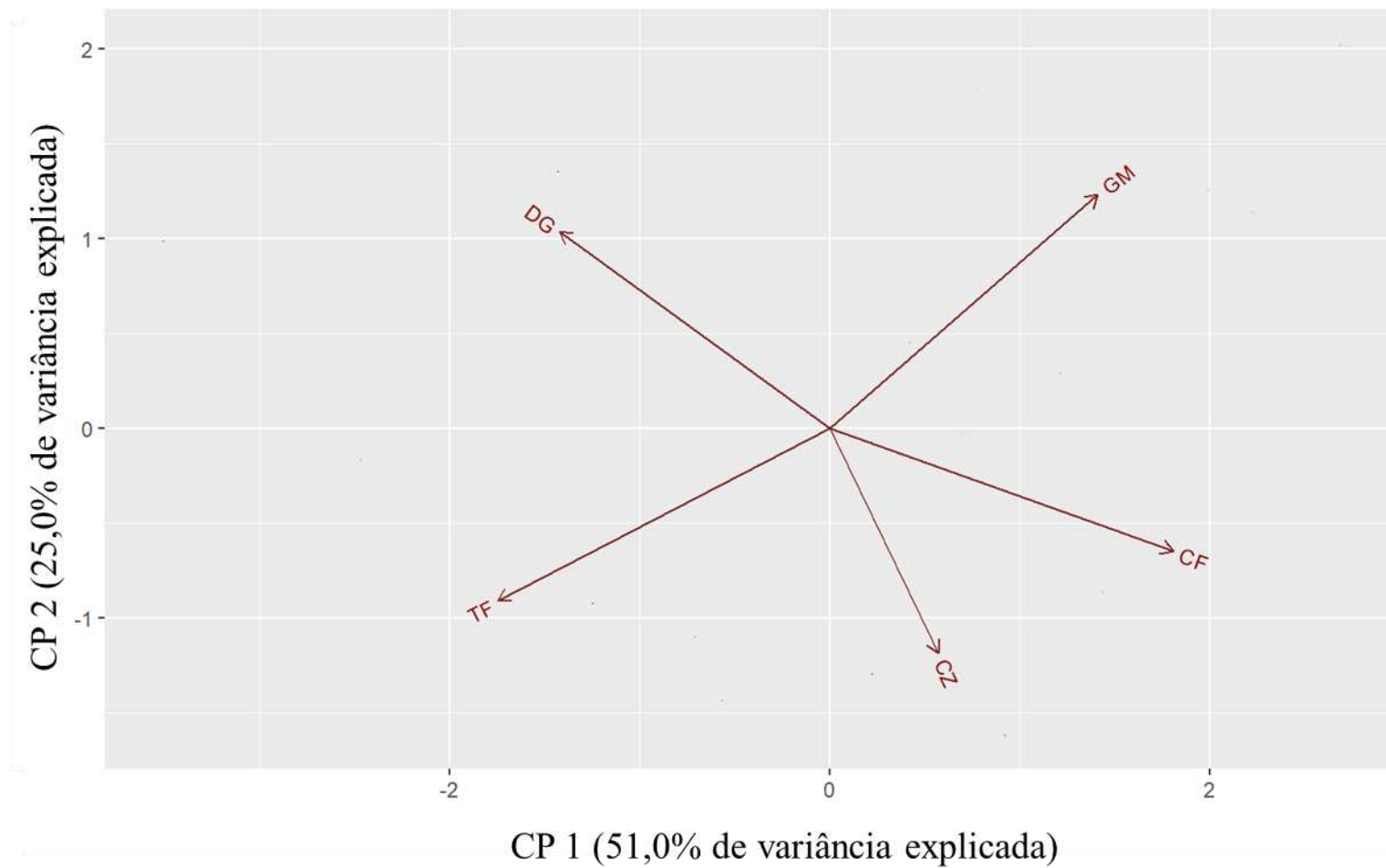


Figura 33 - Vetores das propriedades do carvão vegetal em relação aos componentes principais 1 e 2 para o estoque 3.

ANEXO 3B – RAC 220

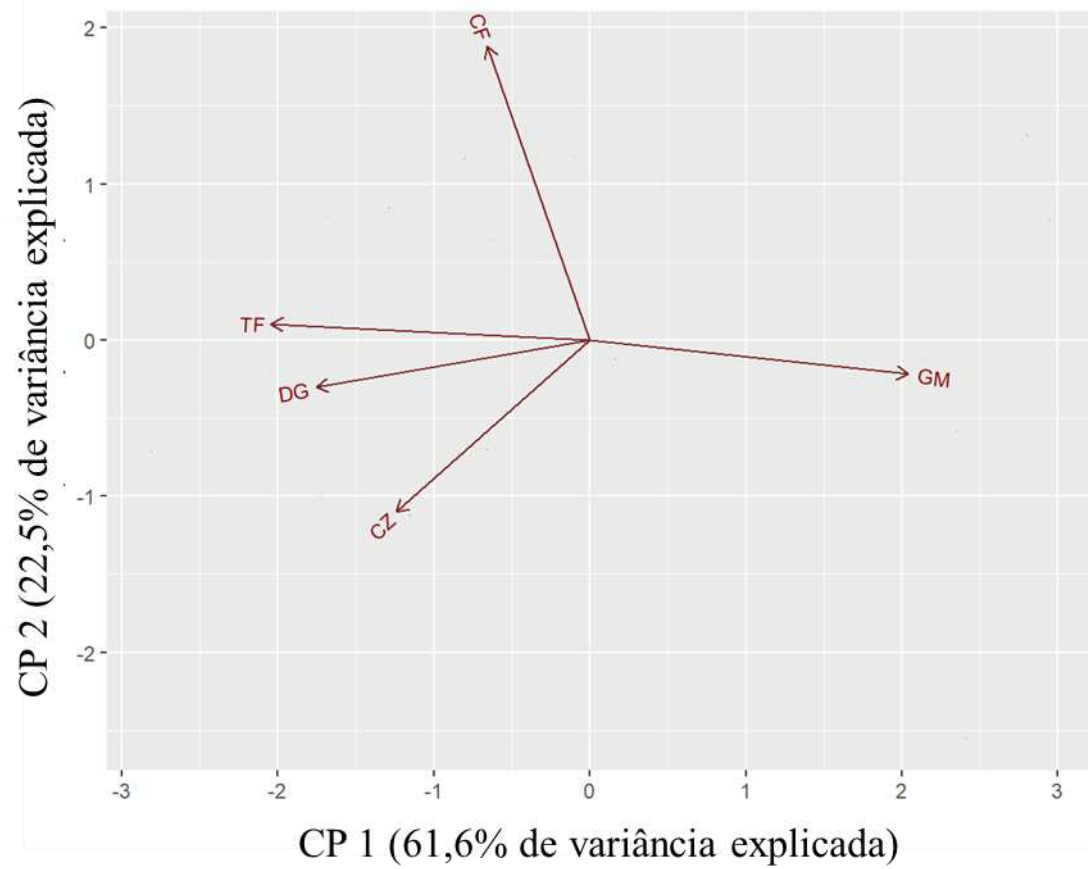


Figura 34 - Vetores das propriedades do carvão vegetal em relação aos componentes principais 1 e 2 para o estoque 1.

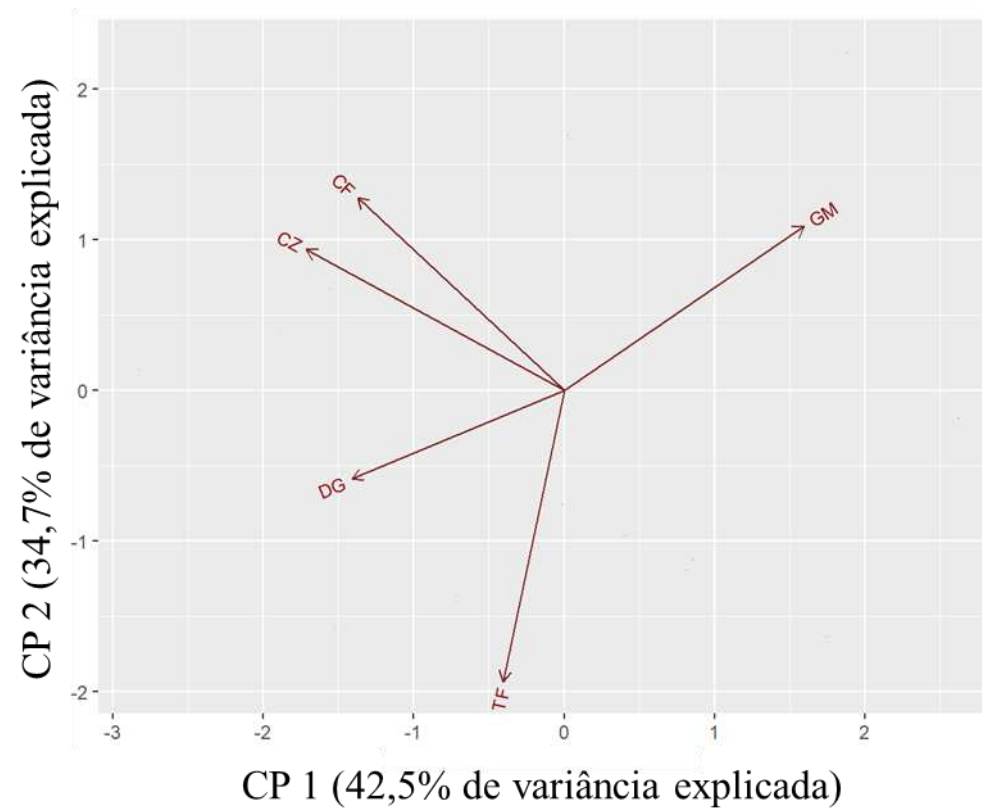


Figura 35 - Vetores das propriedades do carvão vegetal em relação aos componentes principais 1 e 2 para o estoque 2.

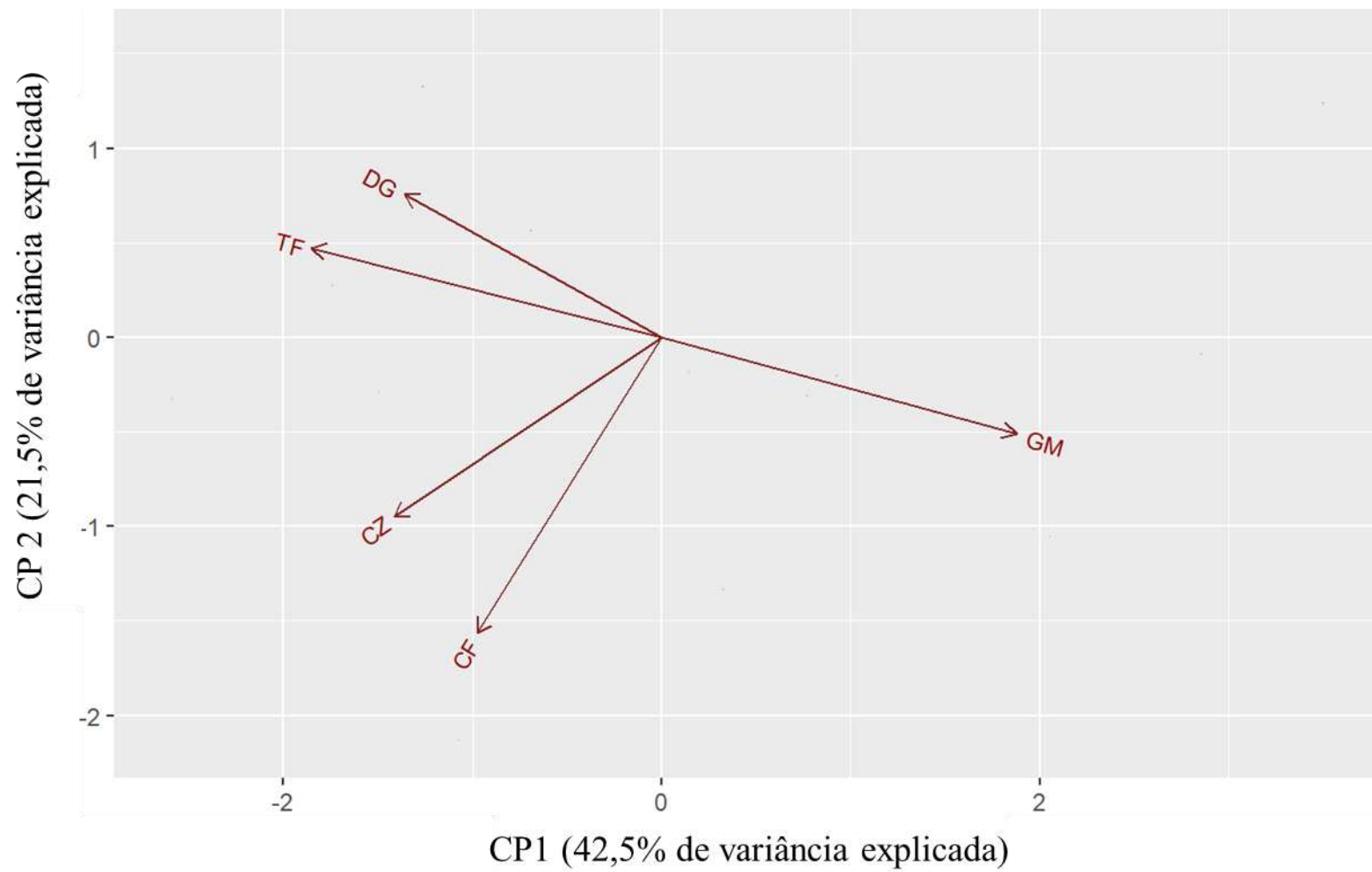


Figura 36 - Vetores das propriedades do carvão vegetal em relação aos componentes principais 1 e 2 para o estoque 3.

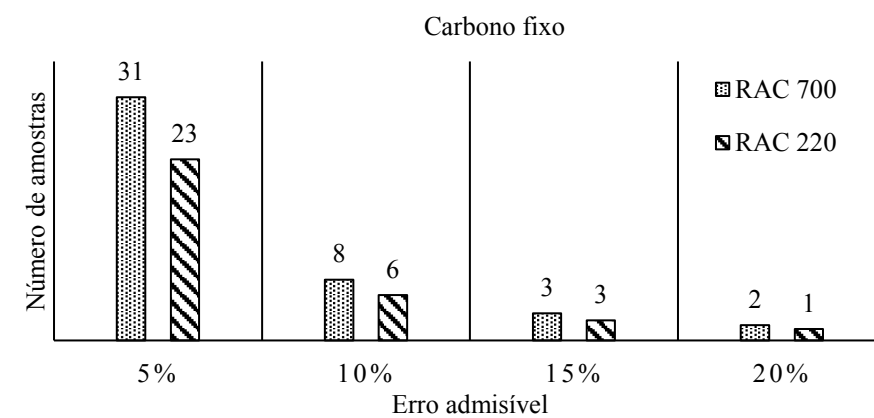
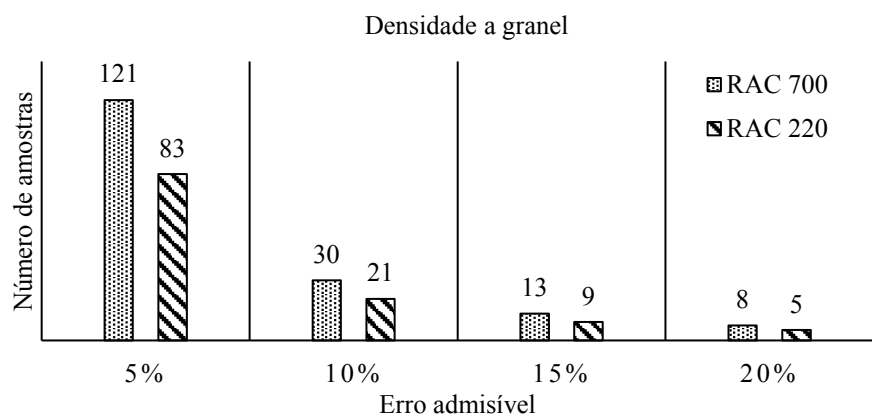
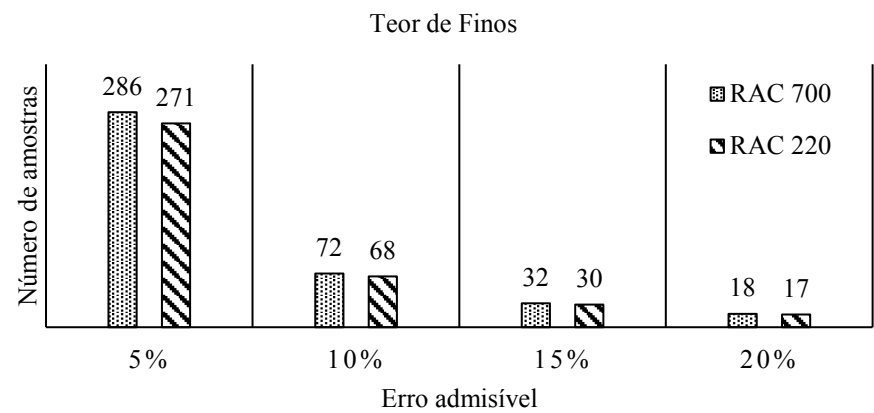
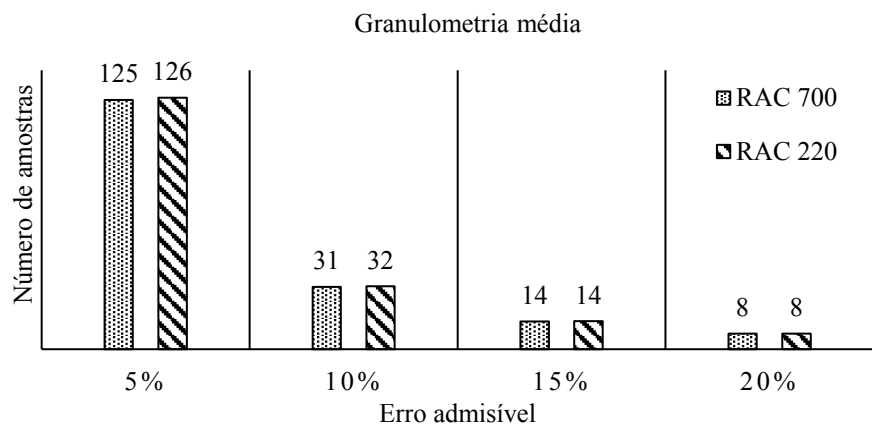
ANEXO 4 – Estatística descritiva da amostragem realizada de acordo com a ABNT NBR 6923 (metodologia manual de amostragem usualmente utilizada nas empresas de carvão vegetal)

Tabela 1 – Estatística descritiva dos valores obtidos para as propriedades do carvão vegetal por meio da metodologia preconizada pela ABNT NBR 6923

	GM (mm)		TF (%)		CF (%)		MV (%)		CZ (%)	
	RAC 700	RAC 220	RAC 700	RAC 220	RAC 700	RAC 220	RAC 700	RAC 220	RAC 700	RAC 220
n	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Média	46,41	54,58	4,9	3,33	78,1	75,29	20,64	23,00	1,26	1,87
Máximo	48,35	58,13	6,29	4,00	79,25	77,87	22,3	25,62	1,51	25,81
Mínimo	45,02	49,40	3,41	3,00	76,62	73,07	19,41	20,59	0,97	3,39
Desvio-padrão	1,19	3,06	0,98	0,52	0,98	2,04	1,13	1,81	0,22	0,95
CV (%)	2,56	5,60	20,08	15,62	1,25	2,70	5,5	7,86	17,75	50,70
Intervalo de confiança	46,41 ± 0,98	54,58 ± 3,21	4,90 ± 0,40	3,33 ± 0,54	78,10 ± 0,80	75,59 ± 2,13	20,64 ± 0,46	22,99 ± 1,90	1,26 ± 0,09	1,87 ± 0,99

Legenda: n = número de unidades amostrais; CV = coeficiente de variação; GM = Granulometria média; TF = Teor de finos; CF = Carbono fixo; MV = Materiais voláteis; CZ = Cinzas.

ANEXO 5 – Cálculo do número de amostras necessário para cada propriedade por meio dos resultados da amostragem mecanizada



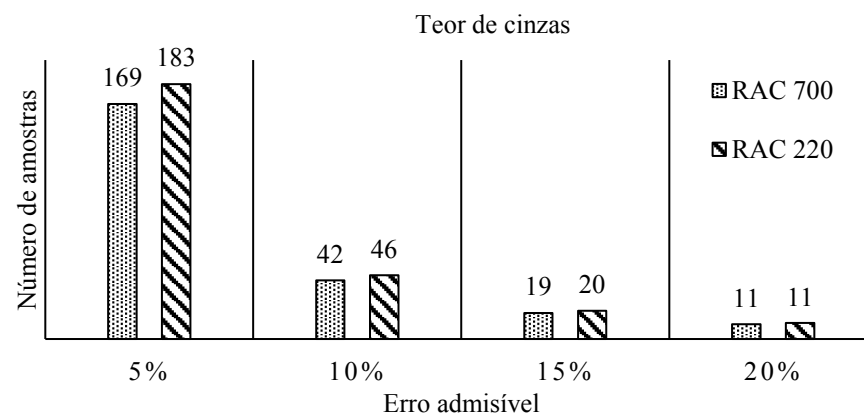


Figura 37 – Cálculo do número de amostras necessárias, de acordo com erro admissível, para cada propriedade do carvão vegetal, nos fornos tipo RAC 700 e RAC 220.