

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Afrânio Adailton Araújo

**Variáveis influenciadoras das características físico-químicas em compostagem e predição da
relação C/N**

Montes Claros

2021

Afrânio Adailton Araújo

Variáveis influenciadoras das características físico-químicas em compostagem e predição da relação C/N

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Junio Cota Silva

Montes Claros

Maio de 2021

Araújo, Afrânio Adailton.

A663v
2021 Variáveis influenciadoras das características físico-químicas em compostagem e
predição da relação C/N [manuscrito]/ Afrânio Adailton Araújo. Montes Claros, 2021.
54 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade
Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Junio Cota Silva

Banca examinadora: Alcinei Místico Azevedo, Márcia Martins, Henrique Maia
Valério, Junio Cota Silva.

Inclui referências: f. 18-22; 36-39; 50-53

1. Resíduos sólidos -- Teses. 2. Análise de regressão -- Teses. 3. Resíduos
orgânicos -- Reaproveitamento -- Teses. I. Silva, Junio Cota. II. Universidade Federal
de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 628.4



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Agrárias
Mestrado em Produção Vegetal

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 06 dias do mês de maio de 2021, às 13:30 horas, sob a Presidência do Professor Junio Cota Silva, D. Sc. (Orientador – ICA/UFMG) e com a participação dos Professores Alcinei Místico Azevedo, D. Sc. (ICA/UFMG), Márcia Martins D. Sc. (ICA/UFMG) e Henrique Maia Valério (UNIMONTES), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de defesa de dissertação de **AFRÂNIO ADAILTON ARAÚJO**, aluno do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de dissertação intitulada: **“Variáveis influenciadoras das características físico-químicas em compostagem e predição da relação C/N”**, sendo o aluno considerado (aprovado/reprovado) **APROVADO**. E, para constar, eu, Professor Junio Cota Silva, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 68 do regulamento do Curso de Mestrado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 06 de maio de 2021.

Alcinei Místico Azevedo
Membro

Henrique Maia Valério
Membro

Márcia Martins
Membro

Junio Cota Silva
Orientador

Agradecimentos

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Cí e João, pelos ensinamentos, conselhos, inspiração, por sempre me apoiarem em minhas decisões e por não medirem esforços para que meus sonhos se realizassem e aos meus irmãos e sobrinhos pelo seu amor que me motiva a seguir em frente;

À minha amiga Gabi, companheira de jornada nesse trabalho, com quem sempre compartilho meus projetos e que sempre me motiva a colocá-los em prática e faz lembrar-me de quem realmente sou;

Ao meu amigo Brayonn, pessoa que por muito tempo tive o privilégio de dividir a mesma morada e, além disso, dividir sonhos e planos; à Silvanete, Ana Paula e Henrique, por todo apoio, conselhos e diversão, são amigos que fazem qualquer desafio ficar mais tranquilo;

A todos os funcionários do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, por todo o apoio na realização desse trabalho e cordialidade que faziam todo trabalho parecer mais leve;

Ao Professor Junio pela orientação e direcionamentos para a realização desse trabalho;

Aos membros da banca, Alcinei, Márcia e Henrique Maia, por suas contribuições para a melhoria desse trabalho;

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, às políticas de acesso à pós-graduação e à CAPES pela concessão de bolsa, pois apenas com esse apoio foi possível a realização desse mestrado;

A todos que, direta ou indiretamente, me auxiliaram na execução desse trabalho, me apoiaram e torceram por mim.

Meus sinceros agradecimentos!

“Eu dedico meu espírito a serviço do que é bom e justo, todos os dias que estou vivo, recebo oportunidades de me tornar aquilo que mais admiro nas outras pessoas.”

(Brittany Howard)

Variáveis influenciadoras das características físico-químicas em compostagem e predição da relação C/N

RESUMO

Seguindo a tendência mundial de aumento da geração de resíduos sólidos, várias iniciativas e processos sustentáveis tem surgido para auxiliar na gestão desses resíduos. Um dos métodos mais difundidos para o tratamento de resíduos orgânicos é a compostagem, processo de decomposição biológica controlada da matéria orgânica em um ambiente aeróbio. Durante o processo de compostagem ocorrem várias transformações no material orgânico, que são influenciadas por diversos fatores como atividade de microrganismos, relação carbono/nitrogênio, pH, temperatura e umidade da pilha de compostagem. Todos esses fatores interagem entre si para regular o processo de transformação do material orgânico. Assim, o entendimento desses fatores pode contribuir para a melhor eficiência biológica e econômica do processo. O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto da inclusão de diferentes proporções de resíduos vegetais na compostagem de esterco bovino sobre as características físico-químicas do composto produzido e utilizá-las para estimar a relação C/N através de modelos de regressão selecionados com auxílio do método dos Melhores Subconjuntos de Regressão (Best-subsets). Diferentes misturas de compostagem foram preparadas utilizando três tipos de resíduos: esterco bovino, restos de poda e varrição e maravalha de perobeira. As variáveis teor de matéria orgânica (MO), pH, condutividade elétrica (CE), carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e relação C/N foram mensuradas ao longo do processo. Houve diferença entre as composições de resíduos ao longo do processo de compostagem. Os resultados sugerem que a inclusão de agentes de volume contribui para a concentração de NT no composto enquanto que a baixa inclusão desses materiais pode favorecer a perda desse nutriente. Entretanto, níveis elevados de agentes de volume podem gerar um composto com elevada relação C/N após o período de compostagem, o que poderia inviabilizar sua utilização agrônômica. Além disso, dentre os parâmetros avaliados, a matéria orgânica é um dos principais fatores associados com a relação C/N, sendo possível estimar a relação C/N com um modelo de regressão considerando apenas o teor de MO. Quando o fator tempo foi adicionado no modelo, foram obtidos melhores índices estatísticos, como melhor R^2 ajustado, estatística C_p de Mallows, soma de quadrados residual e Critério de Informação Bayesiano, sem prejuízos à aplicação prática do modelo.

Palavras-chave: resíduos sólidos; best-subsets; reaproveitamento de resíduos.

Variables influencing the physicochemical characteristics of composting and prediction of the C/N ratio

ABSTRACT

There is a worldwide trend in increasing the generation of solid waste and alternatives to mitigate its negative effects have gained more and more prominence. A most widespread methods for the treatment of organic waste is composting, this process can be defined as the controlled biological decomposition of organic matter in an aerobic environment. During the composting process, several transformations occur in the organic material, these transformations are mediated by several factors such as the performance of microorganisms, carbon / nitrogen ratio, pH, temperature and humidity of the compost pile. All of these factors interact with each other to regulate the process of transformation of organic material, so understanding these factors can contribute to better biological and economic efficiency of the process. The objective of this study was to evaluate the impact of including different proportions of plant residues in composting cattle manure on the physical-chemical characteristics of the compost produced and using them to estimate the C/N ratio using linear equations selected with the aid of the method Best-subsets Selection. Different compost mixtures were created using three types of waste: bovine manure, pruning and sweeping remains and perobeira wood shavings. Variables such as organic matter content (OM), pH, electrical conductivity (EC), total organic carbon (TOC), total nitrogen (NT) and C/N ratio were monitored throughout the process. There was a difference between the different waste compositions throughout the composting process. The results suggest that the inclusion of bulking agents contributes to the concentration of NT in the compound, while the low inclusion of these materials may favor the loss of this nutrient. However, high levels of bulking agents can generate a compound with a high C/N ratio after the composting period, which could make its agronomic use unfeasible. In addition, among the evaluated parameters, organic matter is one of the main factors associated with the C/N ratio, being possible to estimate the C / N ratio with a regression model considering only the OM content. When the time factor was added to the model, better statistical indexes were obtained, such as best adjusted R², Mallows' Cp statistic, residual sum of squares and Bayesian Information Criterion, without prejudice to the practical application of the model.

Keywords: solid waste; best-subsets selection; waste reuse.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral	10
2.2 Objetivos específicos	10
3 REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1 Panorama dos resíduos orgânicos no Brasil	11
3.2 O processo de compostagem	11
3.2.1 Temperatura e microrganismos.....	12
3.2.2 Relação C/N.....	13
3.2.3 Umidade.....	13
3.2.4 Determinação do estágio de maturação do composto	14
3.3 Abordagens estatísticas e matemáticas aplicadas ao processo de compostagem	15
3.3.1 Melhores subconjuntos de regressão (Bests-subsets)	15
3.5 Referências	18
4 ARTIGOS	23
4.1 Artigo 1 - Parâmetros de qualidade na compostagem de diferentes substratos orgânicos	23
4.2 Artigo 2 - Uso do método de seleção de variáveis Best-Subsets para estimar relação C/N no processo de compostagem.....	40
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
APÊNDICE	54

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento inadequado de resíduos sólidos gera impactos sociais e ambientais. Segundo dados do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) em torno de 3% das emissões globais de gases do efeito estufa estão relacionados à disposição inadequada de resíduos no solo e tratamento de efluentes (IPCC, 2007), além disso, há problemas com contaminação do solo, ar, águas subterrâneas e superficiais e proliferação de vetores de doenças onde esses resíduos são depositados.

A compostagem é uma das alternativas disponíveis para diminuir o impacto da disposição inadequada dos resíduos sólidos no ambiente. O manejo inadequado e falhas nesse processo podem colocar em risco sua viabilidade ambiental. Alguns agravantes ambientais, como a produção de chorume, liberação mais do que o convencional de gases poluentes como gás carbônico, metano e amônia podem ocorrer durante o processo de compostagem (SILVA *et al.*, 2009).

Para a determinação da estabilização final do composto e os manejos a serem adotados no processo de compostagem aeróbia geralmente são utilizados métodos empíricos e práticos. Apesar de existirem métodos analíticos químicos e biológicos que podem ser utilizados, eles são pouco aplicados por envolverem a utilização de equipamentos sofisticados, o que pode inviabilizar essa prática. Além disso, muitas variáveis estão envolvidas no processo de compostagem, sendo difícil estabelecer um valor universal para avaliar o seu grau maturidade e humificação (VALENTE *et al.*, 2009).

O estudo e a determinação de variáveis críticas no processo de compostagem podem ser importantes para melhor elucidação do processo, bem como auxiliar na determinação e até mesmo a predição de índices importantes. Dessa forma, o presente trabalho poderá fornecer ferramentas que permitam um melhor gerenciamento e controle do processo em larga escala, contribuindo significativamente para o desenvolvimento tecnológico no setor de compostagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Determinar os parâmetros mais adequados para predição da relação C/N a partir da avaliação dos parâmetros de qualidade e maturidade do composto orgânico produzido com diferentes substratos.

2.2 Objetivos específicos

- Compreender as transformações físico-químicas que ocorrem em resíduos orgânicos agropecuários compostados em diferentes níveis de inclusão de agentes de volume;
- Determinar qual(is) variável(is) é(são) determinante(s) para o controle do processo de compostagem;
- Analisar a evolução dos parâmetros envolvidos no processo de compostagem;
- Construir um modelo preditivo para a relação C/N.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Panorama dos resíduos orgânicos no Brasil

Nos últimos anos o aumento da população urbana e da industrialização tem levado a uma exploração mais intensiva dos recursos naturais. Soma-se a isso o fato de que a alteração no estilo de vida da população e a exigência por produtos cada vez mais industrializados tem requisitado maior demanda por alimentos. Como consequência, o setor agrícola, pecuário e suas agroindústrias associadas são cada vez mais explorados. O aumento nessa demanda é acompanhado pelo aumento na geração de resíduos orgânicos, esses resíduos podem ocasionar problemas ambientais, exigindo cuidados especiais quanto ao seu destino final (GOUVEIA, 2012).

Quando não tratados da forma correta, os resíduos orgânicos apresentam considerável efeito poluidor, ocasionando problemas ambientais e sanitários, contaminando solo, água, emitindo odores desagradáveis e gases poluentes. Nota-se também uma tendência mundial no aumento da preocupação com as questões ambientais, no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi um marco no que se refere ao destino final dos resíduos sólidos (DEUS; BATTISTELLE; SILVA, 2015).

A PNRS, instituída pela Lei 12.305/2010, estabelece as diretrizes, conceitos, responsabilidades dos geradores de resíduo e do poder público e instrumentos econômicos aplicáveis quanto aos resíduos sólidos. Essa lei traz a diferenciação resíduo e rejeito, sendo resíduo todo material, substância ou objeto, que mesmo depois de descartado, ainda comporta alguma possibilidade de uso. Rejeitos são resíduos sólidos que, depois de findadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não há outra alternativa a não ser a sua disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Uma das maneiras de diminuir o impacto ambiental causado por esses resíduos é o seu tratamento biológico através da compostagem, que visa a transformação desses compostos em fertilizantes orgânicos. Assim, com a reciclagem desses resíduos orgânicos, eles passam a ser uma fonte de matéria prima alternativa que além de diminuir impactos ambientais, contribui para a redução de custos finais dos setores industriais geradores e consumidores de resíduos (FIORI; SCHOENHALS; FOLLADOR, 2008).

3.2 O processo de compostagem

A compostagem pode ser definida como um processo controlado de decomposição de resíduos orgânicos pela ação de microrganismos aeróbios, onde o material orgânico é transformado em material estabilizado e rico em nutrientes. Durante o processo de decomposição do material orgânico realizado pelos microrganismos, normalmente há a liberação de vapor d'água e dióxido de carbono, mas há também a liberação de outros gases como a amônia (BRITO, 2006).

A ação dos microrganismos sobre o material orgânico durante o processo de compostagem é caracterizada pela intensa liberação de calor que é sucedida por uma queda gradual na temperatura até permanecer constante e próxima a temperatura ambiente, sendo possível a identificação de três fases distintas. A fase mesofílica, a primeira a ocorrer, caracterizada pela ação de microrganismos mesofílicos, onde predominam temperaturas moderadas. Em seguida o processo de decomposição é acompanhado

da elevação da temperatura, sendo essa fase chamada de termofílica. Após o término dessa fase a temperatura começa a cair gradativamente até se aproximar da temperatura ambiente, é nessa fase que ocorre a humificação da matéria orgânica e é referida como fase de maturação (SILVA *et al.*, 2009).

Ao final do processo de compostagem se obtém o composto orgânico, produto rico em matéria orgânica e nutrientes minerais, passível de ser utilizado como fertilizante e substrato para a agricultura e também na recuperação de áreas degradadas (KIEHL, 2010). A composição final do composto orgânico é extremamente dependente dos materiais utilizados na compostagem, podendo ser comercializado desde que atenda as exigências mínimas de qualidade e segurança estabelecidas pela instrução normativa nº. 61, de 8 de JULHO de 2020 (BRASIL, 2020).

Durante o processo de compostagem ocorrem várias transformações no material orgânico, essas transformações são mediadas por diversos fatores químicos, físicos e biológicos, como atuação de microrganismos, relação carbono/nitrogênio (C/N) dos materiais adicionados, disponibilidade de oxigênio, pH, temperatura e umidade da pilha de compostagem. Todos esses fatores interagem entre si para regular a transformação do material orgânico, portanto o entendimento desses fatores pode contribuir para a melhor eficiência biológica e econômica do processo (PRÁ *et al.*, 2009).

3.2.1 Temperatura e microrganismos

Durante a decomposição da matéria orgânica no processo de compostagem ocorrem variações na temperatura do substrato em decorrência da atividade bioquímicas de oxidação da matéria orgânica promovida pelos microrganismos predominantes no meio, sendo assim, este parâmetro é um reflexo da atividade microbiana e nos permite identificar a eficiência durante o processo e o seu equilíbrio biológico (MATOS, 2014; HERBERTS *et al.*, 2005; MAIA *et al.*, 2003). Segundo Brito (2006) a evolução da temperatura durante a compostagem está intimamente relacionada com a velocidade de decomposição da matéria orgânica e com a velocidade com a qual os microrganismos atuam e se multiplicam.

As modificações que ocorrem na matéria orgânica promovidas por microrganismos vêm acompanhadas de alterações na temperatura da pilha de compostagem, sendo possível estabelecer relações entre essas variáveis. Logo após a montagem da pilha de composto o processo de decomposição mais efetivo é realizado por microrganismos mesófilos. A medida que o material orgânico é decomposto há aumento na liberação de calor decorrente do metabolismo microbiano. Ao atingir a temperatura de 40-60°C há a predominância de microrganismos termófilos, como os actinomicetos, esta fase é chamada de fase termofílica da compostagem (XIAO *et al.*, 2011).

O alcance da fase termofílica é fundamental para o sucesso do processo de compostagem, uma vez que é nesta fase que são quebrados compostos como celulose, hemicelulose, amido, proteínas e gorduras, também é a fase onde a decomposição acontece de maneira mais rápida (QIAN *et al.*, 2016; BERNAL; ALBURQUERQUE; MORAL, 2009). Além disso, as altas temperaturas da fase termofílica propiciam a morte de alguns microrganismos patogênicos às plantas (SUÁREZ-ESTRELLA *et al.*, 2007), e aos animais, como *Escherichia coli* e bactérias do gênero *Salmonella* e *Streptococcus* (HASSEN *et al.*, 2001), uma vez que eles não conseguem sobreviver a essas temperaturas. No entanto a elevação

indiscriminada da temperatura favorece a perda de nitrogênio por volatilização na forma de amônia (KOYAMAA *et al.*, 2018).

Durante a fase termofílica há pouca diversidade e alta similaridade entre os microrganismos atuantes, indicando a predominância de algumas espécies adaptadas nessa fase, como bactérias do filo *Firmicutes* e *Proteobacteria*. À medida que são consumidos os estoques de carbono durante a fase termofílica, a temperatura tende a decair, propiciando novamente o desenvolvimento de microrganismos mesofílicos, que aparecem em maior diversidade biológica do que na fase termofílica, é nesta fase que ocorre a estabilização e a humificação da matéria orgânica (WANG *et al.*, 2017; VINNERAS; JONSSON, 2002).

3.2.2 Relação C/N

O balanço adequado de carbono e nitrogênio é fundamental para a eficiência do processo de compostagem uma vez que esses elementos são essenciais para a sobrevivência dos microrganismos, sendo o carbono a fonte de energia e o nitrogênio essencial para a síntese de proteínas (KIEHL, 2010). De maneira geral, a relação C/N do material em compostagem tende a diminuir gradativamente, mas essa redução é mais acentuada durante a fase mais ativa de decomposição (fase termofílica), devido à decomposição da matéria orgânica e mineralização de nutrientes pelos microrganismos, o que promove a perda de carbono na forma de gás carbônico (BERNAL; ALBURQUERQUE; MORAL, 2009).

De acordo com Valente *et al.* (2009) no início do processo de compostagem é ideal que a relação C/N esteja entre 25/1 e 35/1. No entanto, a acessibilidade desse carbono aos microrganismos também tem influência sobre a taxa de decomposição, dessa forma é recomendado que a relação C/N inicial seja maior quando os materiais a serem compostados possuírem grandes quantidade de materiais de difícil degradação como celulose, lignina e hemicelulose, já que a fração biodisponível do carbono é menor do que o carbono total.

A medida que o processo de compostagem avança a intensidade de perda de carbono diminui. As fontes mais acessíveis de carbono são as primeiras a serem consumidas, e na etapa final do processo a síntese de substâncias complexas e polimerizadas formadas pelo processo de humificação prevalecem sobre o processo de mineralização (BERNAL; ALBURQUERQUE; MORAL, 2009). Dessa forma, ao final do processo de compostagem a relação C/N é inferior a inicial, sendo comuns valores entre 10/1 e 20/1 (MAIA *et al.*, 2003). Segundo Wang *et al.* (2017) este índice é um dos indicadores de maturidade e qualidade do composto, no entanto ele não pode ser tido como absoluto para essa determinação, sendo necessário avaliar vários fatores em conjunto.

3.2.3 Umidade

Segundo Herberts *et al.* (2005), o processo de decomposição da matéria orgânica na compostagem é extremamente dependente do teor de umidade, uma vez que a água é fundamental para a atividade microbológica, visto que várias reações bioquímicas ocorrem em meio aquoso. De modo geral, o teor adequado de umidade durante a compostagem deve ser de 50 a 60%, sendo que valores abaixo de 40% limitam a atividade microbiana e valores acima de 65% favorece a formação de ambientes anaeróbios em virtude de ocupação de espaços porosos pela água, dificultando a distribuição

de oxigênio pelo material. Como consequência do excesso de umidade ocorre a decomposição anaeróbia da matéria orgânica, o que pode ocasionar a liberação de odores desagradáveis e perdas de nutrientes (MAIA *et al.*, 2003; PEDROSA *et al.*, 2013).

O teor adequado de umidade da pilha de compostagem e eficiência de aeração estão intimamente relacionados. Haug (1993) afirma que as características dos materiais a serem compostados devem ser levados em consideração ao se definir o nível de umidade, materiais fibrosos por exemplo, conseguem manter sua porosidade e estrutura mesmo absorvendo grandes quantidades de água, enquanto que para outros materiais como resíduos vegetais frescos, a influência da alta umidade sobre a disponibilidade de oxigênio pode inviabilizar o processo de decomposição aeróbia. Além disso, o nível de umidade tem influência sobre outras propriedades do composto como densidade aparente, permeabilidade do ar, espaço disponível para ocupação com ar e condutividade térmica (HUET *et al.*, 2012).

O teor de umidade tem influência direta na atividade de microrganismos e como consequência, na temperatura do composto, visto que a elevação temperatura é uma consequência do metabolismo microbiano. De acordo com Margesin; Cimadom; Schinner (2006), a baixa disponibilidade de água durante a compostagem de lodo de esgoto e restos de podas, influenciou negativamente a eficiência microbiológica durante a decomposição da matéria orgânica. Segundo Tiquia; Tam; Hodgkiss (1998), o controle da umidade durante o processo de compostagem reduziu o tempo de decomposição, enquanto a condução do processo em 70% de umidade aumentou o tempo de decomposição e maturação do composto.

3.2.4 Determinação do estágio de maturação do composto

A compostagem de resíduos orgânicos é um processo dinâmico, que sofre influência de diversos fatores. Durante o processo de decomposição da matéria orgânica vários compostos são degradados enquanto outros são formados e/ou complexados. Os conceitos de maturidade e estabilidade do composto dizem respeito à essa dinâmica de transformação. De acordo com Guo *et al.* (2012), a estabilidade é referente a atividade microbiana no substrato e a maturidade está relacionada com a degradação de substâncias orgânicas fitotóxicas.

Por se tratar de um processo complexo e mediado por diversos fatores, é difícil o estabelecimento de um indicador universal para a maturidade/estabilidade do composto (ONWOSI *et al.*, 2017). Alguns parâmetros como temperatura, perda de matéria orgânica, relação C/N, capacidade de troca catiônica, índice de germinação de sementes, relação ácido húmico/ácido fúlvico tem sido estudados para expressar o grau de maturação/estabilidade do composto orgânico (RAJ; ANTIL, 2011). Alguns métodos aplicados *in loco* também têm sido utilizados para a determinação da maturidade do composto, como cor, textura, odor, etc. (OVIEDO-OCAÑA *et al.*, 2015).

No entanto, um dos índices mais difundidos para o acompanhamento do processo de compostagem é a relação C/N. Com o avanço do processo de decomposição da matéria orgânica e estabilização do composto, a relação C/N tende a diminuir, sendo esse um dos indicativos de sua maturidade (IQBAL *et al.*, 2015).

Não há um consenso sobre qual valor de relação C/N final é o mais adequado para avaliar a maturidade do composto. De acordo com Swarnam *et al.* (2016) a relação C/N abaixo de 20 é um indicativo da maturidade do composto e que para sua utilização para fins agrônômicos são recomendados valores abaixo de 15, por sua vez, Raj; Antil (2011) consideram que a maturidade só é atingida em valores de C/N menores que 15, enquanto que Awasthi *et al.* (2014) afirmam que o valor igual ou menor que 25 é aceitável. Apesar das divergências, a legislação brasileira preconiza que o composto orgânico deve ser comercializado com a relação C/N máxima de 20 (BRASIL, 2020).

3.3 Abordagens estatísticas e matemáticas aplicadas ao processo de compostagem

O processo de compostagem é dinâmico e complexo, o uso de técnicas de modelagem matemática e métodos estatísticos tem auxiliado no entendimento desse processo, na previsão do desempenho, exploração de novos conceitos e na solução de problemas práticos. Nesse sentido a abordagem estatística tem ganhado destaque para lidar com os fatores aleatórios de muitos componentes do sistema de compostagem (LI *et al.*, 2013). Essa abordagem busca o entendimento de como certas variáveis conhecidas e suas modificações podem afetar o desenvolvimento geral do processo (NATH; DAS, 2011).

Métodos como redes neurais artificiais têm sido aplicadas para descrever o processo de compostagem com vários tipos de materiais, estudando variáveis como emissões de amônia (BONIECKI *et al.*, 2012), perda de calor da massa de compostagem (BONIECKI *et al.*, 2013), pH (LIN; WEI; TSAI, 2016) e estágio de maturação em função da análise de imagens (BONIECKI *et al.*, 2019). A utilização da modelagem matemática para simulação do processo de compostagem também tem trazido resultados relevantes, sendo utilizados para descrever o teor de umidade (WANG *et al.*, 2015), cinética de degradação de substratos orgânicos (WANG; WITARSA, 2016), degradação do carbono (VILLASEÑOR *et al.*, 2012), quantidade de biomassa, oxigênio e dióxido de carbono (VASILIADOU *et al.*, 2015), emissão de dióxido de carbono, água e amônia (OUDART *et al.*, 2015).

A análise de regressão é um método estatístico que estabelece uma relação entre a variável resposta (dependente) e uma ou mais variáveis preditoras (KUTNER *et al.*, 2004). Esse método é bastante difundido em várias áreas do conhecimento e tem sido utilizado para a predição de diversas variáveis relacionadas ao processo de compostagem, como por exemplo para a determinação dos níveis nutricionais na compostagem com esterco de galinha (HUANG; WANG; HAN, 2011) e concentração de odor (RINCÓN *et al.*, 2019). Frequentemente para a análise de regressão são envolvidas uma série de variáveis candidatas a preditoras, que por sua vez podem gerar inúmeras possibilidades de modelos de regressão. O método de seleção de variáveis *Best-subsets* permite a comparação de vários modelos de regressão por meio de estatísticas resumidas, selecionando um ou mais subconjuntos de variáveis que melhor se relacionam para a predição da variável resposta com base em fundamentos estatísticos (KING, 2003). Apesar das vantagens do método não há estudos utilizando *Best-subsets* aplicados à compostagem.

3.3.1 Melhores subconjuntos de regressão (*Best-subsets*)

Um problema recorrente da aplicação da regressão múltipla é a seleção de variáveis candidatas a preditoras para aplicação no melhor modelo de regressão. Dado um conjunto de variáveis preditoras, o desafio é selecionar o conjunto de variáveis que otimize algum critério estatístico (GATU; YANEV; KONTOGHIORGHES, 2007). O conhecimento teórico e a natureza dos dados de pesquisa podem ser importantes para a seleção dessas variáveis, no entanto esse método está sujeito ao erro por ser subjetivo, uma vez que nem todos os pesquisadores possuem o mesmo nível de conhecimento e experiência. Além disso, quando são envolvidas muitas variáveis a aplicação de métodos matemáticos para a seleção torna o processo mais rápido e confiável. Dentre as abordagens matemáticas que podem ser utilizadas para a seleção de variáveis preditoras e modelos de regressão, as mais utilizadas são o método *Stepwise* e *Best-subsets* (RUENGVIRAYUDH; BROOKS, 2016).

Apesar de apresentarem o mesmo propósito, o método *Best-subsets* e *Stepwise* se divergem no método de seleção. O método *Best-subsets* não se limita a selecionar apenas um único modelo que o algoritmo de seleção julgou ser adequado, cabe ao pesquisador considerar outros indicadores para selecionar o modelo. Além de critérios estatísticos o usuário pode também utilizar de comparações com base em sua experiência e outros critérios. Por exemplo, critérios econômicos ou de facilidade de obtenção de dados podem ser relevantes na seleção do modelo. Modelos semelhantes podem descrever muito bem o comportamento da variável resposta, no entanto, um inclui parâmetros mais fáceis de se obter, sendo assim, o pesquisador poderá optar por esse modelo. Além disso, como são apresentados uma seleção com os melhores subconjuntos, há um risco reduzido de que variáveis importantes sejam negligenciadas, além de que a incerteza de cada modelo pode ser avaliada de forma clara (KING, 2003; GOODENOUGH; HART; STAFFORD, 2012).

O método de seleção *Best-subsets* é baseado em estimar critérios estatísticos para todos os modelos possíveis, de todos os tamanhos (isto é, número de preditores) e considerando todas as combinações de variáveis preditoras. O número total de modelos de todos os tamanhos é equivalente a $2^p - 1$, onde “p” é o número de variáveis candidatas a preditoras (RUENGVIRAYUDH; BROOKS, 2016; HEINZE; WALLISCH; DUNKLER, 2018).

O número total de modelos possíveis aumenta exponencialmente a medida que a quantidade de variáveis candidatas a preditoras aumenta. Como desvantagem, a quantidade de poder computacional necessária para avaliar todos os modelos de regressão também aumenta (OKCU; PEKTAS; UYUMAZ, 2016).

Os melhores modelos estimados para cada tamanho são selecionados de acordo com a menor soma de quadrados residual (KING, 2003; HOFMANN; GATU; KONTOGHIORGHES, 2007). Além disso, os modelos selecionados podem ser comparados por estatísticas resumidas, como R^2 ajustado, Critério de Informação Bayesiano (BIC) e Estatística C_p de Mallows. Essas ferramentas contribuem para evitar a inclusão indiscriminada de variáveis, o que pode ocasionar problemas de multicolinearidade. Burgel; Anzanello (2018) relatam que conseguiram reduzir o número de variáveis preditoras além de melhores ajustes de regressão utilizando o método *Best-subsets*.

O método *Best-subsets* pode ser uma ferramenta eficaz para a seleção do modelo mais parcimonioso, com melhor ajuste e com melhor aplicabilidade em situações práticas, uma vez que

permite a avaliação do pesquisador. Além disso por permitir uma avaliação individual de cada modelo é possível ter uma noção da importância relativa de cada variável (KING, 2003). Por exemplo, no subconjunto que leva em consideração apenas uma variável preditora provavelmente esta será a mais importante para estimar a variável resposta. Outras associações também podem ser inferidas, como por exemplo a variável mais frequente nos diferentes modelos e diferentes subconjuntos também será uma das variáveis mais importantes e possivelmente a mais relacionada com a variável resposta.

3.5 Referências

- AWASTHI, M. K.; PANDEY, A. K.; KHAN, J.; BUNDELA, P. S.; WONG, J. W. C.; SELVAM, A. Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. **Bioresource Technology**, vol. 168, p. 214–221, 2014.
- BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**, vol. 100, p. 5444–5453, 2009.
- BONIECKI, P.; IDZIOR-HAUFA, M.; PILARSKA, A. A.; PILARSKI, K.; KOLASA-WIECEK, A. Neural classification of compost maturity by means of the self-organising feature map artificial neural network and learning vector quantization algorithm. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, 2019.
- BONIECKI, P.; DACH, J.; PILARSKI, K.; PIEKARSKA-BONIECKA, H. Artificial neural networks for modeling ammonia emissions released from sewage sludge composting. **Atmospheric Environment**, v. 57, p. 49-54, 2012.
- BONIECKI, P.; DACH, J.; MUELLER, W.; KOSZELA, K.; PRZYBYL, J.; PILARSKI, K.; OLSZEWSKI, T. Neural prediction of heat loss in the pig manure composting process. **Applied Thermal Engineering**, v. 58, p. 650-655, 2013.
- BRASIL. Decreto 7.404/10, 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a política nacional de resíduos sólidos, cria o comitê interministerial da política nacional de resíduos sólidos e o comitê orientador para a implantação dos sistemas de logística reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 dez. 2010, seção 1, p.1, edição extra b.
- BRASIL. Instrução normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020-266802148>
- BRITO, L. M. **Compostagem para a agricultura biológica**. Manual de Agricultura Biológica-Terras de Bouro. Escola Superior Agrária de Ponte de Lima./IPVC, p. 1-21, 2006.
- BURGEL, E.; ANZANELLO, M. J. Abordagem para Seleção de Variáveis Preditivas no Contexto de Controle de Inventários. **Revista Gestão Industrial**, v. 14, p. 154-195, 2018.
- DEUS, R. M.; BATTISTELLE, R. A. G.; SILVA, G. H. R. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n.4, p. 685-698, 2015.
- FIORI, M. G. S.; SCHOENHALS; M.; FOLLADOR, F. A. C. Análise da evolução tempo-eficiência de duas composições de resíduos agroindustriais no processo de compostagem aeróbia. **Engenharia Ambiental**, v. 5, p. 178-191, 2008.
- GATU, C.; YANEV, P. I.; KONTOGHIOGHES, E. J. A graph approach to generate all possible regression submodels. **Computational Statistics and Data Analysis**, v. 52 p. 799–815, 2007.

GOODENOUGH, A. E.; HART, A. G.; STAFFORD, R. Regression with Empirical Variable Selection: Description of a New Method and Application to Ecological Datasets. **PLoS ONE**, v. 7, 2012.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, p. 1503-1510, 2012.

GUO, R.; LI, G.; JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; SHEN, Y. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. **Bioresource Technology**, v. 112, p. 171–178, 2012.

HASSEN, A.; BELGUTH, K.; JEDIDI, N.; CHERIF, A.; CHERIF, M.; BOUDABOUS, A. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 80, p. 217-225, 2001.

HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering**. 1 ed. Boca Raton: Routledge, 1993. 752 p.

HEINZE, G.; WALLISCH, C.; DUNKLER, D. Variable selection – A review and recommendations for the practicing statistician. **Biometrical Journal**, v. 60, p. 431–449, 2018.

HERBERTS, R. A.; COELHO, C. R. A.; MILETTI, L. C.; MENDONÇA, M. M. Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos. **Health and Environment Journal**, v. 6, p. 41-50, 2005.

HOFMANN, M.; GATU, C.; KONTOGHIORGHES, E. J. Efficient algorithms for computing the best subset regression models for large-scale problems. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 52, p. 16–29, 2007.

HUANG, G.; WANG, X.; HAN, L. Rapid estimation of nutrients in chicken manure during plant-field composting using physicochemical properties. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 1455–1461, 2011.

HUET, J.; DRUILHE, C.; TRÉMIER, A.; BENOIST, J. C.; DEBENEST, G. The impact of compaction, moisture content, particle size and type of bulking agent on initial physical properties of sludge-bulking agent mixtures before composting. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 428–436, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.

IQBAL, M. K.; NADEEM, A.; SHERAZI, F.; KHAN, R. A. Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 12, p. 1759–1768, 2015.

KIEHL, E. J. **Novo fertilizantes orgânicos**. 1 ed. Piracicaba: Editora Degaspari, 2010. 248 p.

KING, J. E. Running a best-subsets logistic regression: an alternative to stepwise methods. **Educational and Psychological Measurement**, v. 63(3), 2003.

KOYAMAA, M.; NAGAO, N.; SYUKRI, F.; RAHIM, A. A.; KAMARUDIN, M. S.; TODA, T.; MITSUHASHI, T.; NAKASAKI, K. Effect of temperature on thermophilic composting of aquaculture sludge: NH₃ recovery, nitrogen mass balance, and microbial community dynamics. **Bioresource Technology**, v. 265, p. 207-213, 2018.

LI, Z.; LU, H.; REN, L.; HE, L. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. **Chemosphere**, v. 93, p. 1247–1257, 2013.

LIN, C.; WEI, C. -C.; TSAI, C. -C. Prediction of influential operational compost parameters for monitoring composting process. **Environmental Engineering Science**, v. 33, 2016.

MATOS, A. T. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos**. Viçosa/MG: Editora UFV, 2014. 241 p.

MAIA, C. M. B. F.; BUDZIAK, C. R.; PAIXÃO, R. E.; MANGRICH, A. S. **Compostagem de resíduos florestais**: um guia para produção de húmus através da reciclagem e aproveitamento de resíduos florestais. 21 ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 28 p.

MARGESIN, R.; CIMADOM, J.; SCHINNER, F. Biological activity during composting of sewage sludge at low temperatures. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 57, p. 88–92, 2006.

NATH, K.; DAS, D. Modeling and optimization of fermentative hydrogen production. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 8569–8581, 2011.

KUTNER M. H.; NACHTSHEIM C. J.; NETER J.; Li W. **Applied linear statistical models**. 5 ed. New York: Mc Graw-Hill Irwin. 2004. 1396 p.

OKCU, D.; PEKTAS, A. O.; UYUMAZ, A. Creating a non-linear total sediment load formula using polynomial best subset regression model. **Journal of Hydrology**, v. 539, p. 662–673, 2016.

ONWOSI, C. O.; IGBOKWE, V. C.; ODIMBA, J. N.; EKE, I. E.; NWANKWOALA, M. O.; IROH, I. N.; EZEUGU, L. I. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. **Journal of Environmental Management**, v. 190, p. 140-157, 2017.

LOUDART, D.; ROBIN, P.; PAILLAT, J. M.; PAUL, E. Modelling nitrogen and carbon interactions in composting of animal manure in naturally aerated piles. **Waste Management**, v. 46, p. 588–598, 2015.

OVIEDO-OCAÑA, E. R.; TORRES-LOZADA, P.; MARMOLEJO-REBELLON, L. F.; HOYOS, L. V.; GONZALES, S.; BARRENA, R.; KOMILIS, D.; SANCHEZ, A. Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. **Waste Management**, v. 44, p.63–71, 2015.

PEDROSA, T. D.; FARIAS, C. A. S.; PEREIRA, R. A.; FARIAS, E. T. R. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 1, p. 44-48, 2013.

PRÁ, M. A. D.; CORRÊA, E. K.; CORRÊA, L. B.; LOBO, M. S.; SPEROTTO, L.; MORES, E. **Compostagem como alternativa para gestão ambiental na produção de suínos**. 1 ed. Porto Alegre: Editora Evangraf Ltda, 2009. 143 p.

QIAN, X.; SUN, W.; GU, J.; WANG, X. -J.; ZHANG, Y. -J.; DUAN, M. -L.; LI, H. -C.; ZHANG, R. -R. Reducing antibiotic resistance genes, integrons, and pathogens in dairy manure by continuous thermophilic composting. **Bioresource Technology**, v. 220, p. 425–432. 2016.

RAJ, D.; ANTIL, R. S. Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 2868–2873, 2011.

RINCÓN, C. A.; GUARDIA, A.; COUVERT, A.; WOLBERT, D.; ROUX, S.; SOUTREL, I.; NUNES, G. Odor concentration (OC) prediction based on odor activity values (OAVs) during composting of solid wastes and digestates. **Atmospheric Environment**, v. 201, p. 1–12, 2019.

RUENGVIRAYUDH, P.; BROOKS, G. P. Comparing Stepwise Regression Models to the Best-Subsets Models, or, the Art of Stepwise. **General Linear Model Journal**, v. 42, 2016.

SILVA, F. C.; PIRES, A. M.; RODRIGUES, M. S.; BARREIRA, L. **Gestão pública de resíduo sólido urbano: Compostagem e interface Agro-Florestal**. 1 ed. Botucatu: FEPAF – Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2009. 204 p.

SUÁREZ-ESTRELLA, F.; VARGAS-GARCÍA, M. C.; LÓPEZ, M. J.; MORENO, J. Effect of horticultural waste composting on infected plant residues with pathogenic bacteria and fungi: Integrated and localized sanitation. **Waste Management**, v. 27, p. 886-892, 2007.

SWARNAM, T.P.; VELMURUGAN, A.; PANDEY, S. K.; ROY, S. D. Enhancing nutrient recovery and compost maturity of coconut husk by vermicomposting technology. **Bioresource Technology**, v. 207, p. 76–84, 2016.

TIQUIA, S. M.; TAM, N. F. Y.; HODGKISS, I. J. Changes in chemical properties during composting of spent pig at different moisture contents. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 67, p. 79-89, 1998.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM JR., B. S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. O.; LOPES, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v. 58, p. 59-85, 2009.

VASILIADOU, I. A.; CHOWDHURY, A. K. M. M. B.; AKRATOS, C. S.; TEKERLEKOPOULOU, A. G.; PAVLOU, S.; VAYENAS, D. V. Mathematical modeling of olive mill waste composting process. **Waste Management**, v. 43, p. 61–71, 2015.

VILLASEÑOR, J.; MAYOR, L. R.; ROMERO, L. R.; FERNÁNDEZ, F.J. Simulation of carbon degradation in a rotary drum pilot scale composting process. **Journal of Environmental Management**, v. 108, p. 1-7, 2012.

VINNERAS, B.; JONSSON, H. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method - Laboratory scale and pilot-scale studies. **Bioresource Technology**, v. 84, p. 275-282, 2002.

WANG, X.; PAN, S.; ZHANG, Z.; LIN, X.; ZHANG, Y.; CHEN, S. Effects of the feeding ratio of food waste on fed-batch aerobic composting and its microbial Community. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 397-404, 2017.

WANG, Y.; AI, P.; CAO, H.; LIU, Z. Prediction of moisture variation during composting process: A comparison of mathematical models. **Bioresource Technology**, v. 193, p. 200–205, 2015.

WANG, Y.; F. WITARSA. Application of Contois, Tessier, and first-order kinetics for modeling and simulation of a composting decomposition process. **Bioresource Technology**, v. 220, p. 384–393, 2016.

XIAO, Y.; ZENG, G. -M.; YANG, Z. -H.; MA, Y. -H.; HUANG, C.; XU, Z. -Y.; HUANG, J.; FAN, C. -Z. Changes in the actinomycetal communities during continuous thermophilic composting as revealed by denaturing gradient gel electrophoresis and quantitative PCR. **Bioresource Technology**, v. 102, p.1383–1388, 2011.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1 - Parâmetros de qualidade na compostagem de diferentes substratos orgânicos

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico Journal of Agricultural Science and Technology.

Parâmetros de qualidade na compostagem de diferentes substratos orgânicos

Resumo

A inclusão de agentes de volume, ricos em carbono, é fundamental para a garantia das condições adequadas do processo de compostagem. Entretanto, um desbalanço nas proporções pode comprometer a eficiência do processo do ponto de vista econômico e ambiental. O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto da inclusão de diferentes proporções de resíduos vegetais na compostagem de esterco bovino sobre as características físico-químicas do composto produzido. Os parâmetros avaliados foram: matéria orgânica (MO), pH, condutividade elétrica (CE), carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e relação C/N. Os resultados indicaram que o aumento na inclusão de agentes de volume promove o aumento da MO, pH, COT e relação C/N e redução do NT e CE. As diferentes composições de resíduos se desenvolveram de maneira diferencial ao longo do processo de compostagem. Os resultados sugerem que a inclusão de agentes de volume contribui para a concentração de NT no composto, enquanto que a baixa inclusão desses materiais pode favorecer a perda desse nutriente. A inclusão demasiada desse tipo de resíduo apresentou um composto com elevada relação C/N mesmo findado o período de compostagem, o que pode inviabilizar sua utilização agrônômica em alguns casos.

Palavras-chave: gestão de resíduos, fertilizantes orgânicos, relação C/N.

INTRODUÇÃO

Um dos desafios para alcançar a sustentabilidade ambiental no mundo está na gestão adequada de resíduos gerados pela atividade humana. Em média, cerca de 50% dos resíduos gerados pela humanidade são orgânicos. Tecnologias para o tratamento biológico desses resíduos, como a compostagem, são consideradas um método ecologicamente correto e tem sido cada vez mais difundidas em todo o mundo (Kaza *et al.*, 2018), esse método explora o potencial dos resíduos orgânicos, reciclando seus nutrientes e reduzindo a poluição ambiental (Oliveira *et al.*, 2017).

O processo de compostagem busca a estabilização da matéria orgânica através da decomposição aeróbia controlada em uma mistura contendo materiais ricos em nitrogênio e materiais ricos em carbono, tidos como agentes de volume (Kiehl, 2010). A utilização de agentes de volume no processo de compostagem é fundamental para garantir as condições adequadas do processo, como ajuste da relação C/N, ajuste do teor de umidade e aumento da porosidade garantindo condições aeróbias (Zhou *et al.*, 2014). No entanto, a efetividade na utilização desses materiais está sujeita a sua proporção na mistura de compostagem. A definição da quantidade ideal de agente de volume na compostagem é importante por influenciar nos custos de produção do composto orgânico, além disso ele pode afetar a qualidade do produto final (Zhou *et al.*, 2018).

O resultado final do processo de compostagem está sujeito a diversos fatores, como as características das matérias-primas, os procedimentos adotados no processo e condições ambientais na qual ele é realizado (Faverial *et al.*, 2016). Muscolo *et al.* (2018) argumentam que, apesar de comumente associados, maturidade e qualidade do composto são conceitos diferentes, sendo que a qualidade está principalmente ligada as características da matéria prima utilizada na compostagem.

O entendimento dos parâmetros envolvidos no processo de compostagem é fundamental para auxiliar na compreensão de sua natureza contribuindo para o maior controle do processo, guiar as tomadas de decisões, levando à maior eficiência e qualidade do produto final. Sendo assim é necessário compreender melhor o comportamento das variáveis relacionadas aos processos físico-químicos que ocorrem durante o processo de compostagem. O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto da inclusão de diferentes proporções de resíduos vegetais na compostagem de esterco bovino sobre a matéria orgânica (MO), pH, condutividade elétrica (CE), carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e relação C/N do composto produzido.

MATERIAL E MÉTODOS

A experimentação foi conduzida em casa de vegetação, no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG), em Montes Claros - MG, nos meses de fevereiro a junho de 2020, compreendendo um período de 98 dias de compostagem. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com quatro tratamentos e oito repetições, totalizando 32 parcelas experimentais.

Os tratamentos consistiram em diferentes proporções de três tipos de resíduos orgânicos, sendo eles: esterco bovino, restos de podas e varrição e maravalha de perobeira, as proporções de resíduos utilizadas em cada tratamento constam na tabela 1. O esterco bovino foi coletado na Fazenda Experimental Professor Hamilton de Abreu Navarro, no ICA/UFMG. Os restos de poda e varrição foram obtidos a partir da limpeza e manutenção de áreas verdes do campus do ICA/UFMG, majoritariamente esse material foi constituído por grama, folhas e galhos finos de espécies arbóreas. Por se tratarem de materiais irregulares e heterogêneos quanto ao seu tamanho e composição, os resíduos vegetais foram triturados com desintegrador para reduzir o tamanho de partículas e homogeneizar o material. A maravalha é um subproduto obtido a partir da raspagem ou apra da madeira em serrarias, para realização do experimento esse material foi obtido em serrarias de Montes Claros. A caracterização quanto a umidade, densidade e teores de carbono e nitrogênio dos materiais utilizados na compostagem estão apresentados na tabela 2.

Tabela 1. Caracterização dos tratamentos C1, C2, C3 e C4 quanto ao nível de inclusão (dm³) de resíduos orgânicos de origem animal e vegetal.

Resíduo	Volume de resíduos em cada tratamento (dm ³)			
	C1	C2	C3	C4
Esterco	43 (76,8%)	22,8 (40,7%)	12,6 (22,5%)	6,5 (11,6%)
Restos de podas e varrição	6,5 (11,6%)	16,6 (29,6%)	21,7 (38,8%)	24,75 (44,2%)
Maravalha	6,5 (11,6%)	16,6 (29,6%)	21,7 (38,8%)	24,75 (44,2%)
Total	56	56	56	56

Tabela 2. Caracterização das matérias primas utilizadas no processo de compostagem com diferentes proporções de resíduos orgânicos de origem animal e vegetal.

Resíduo	Umidade (%)	Densidade (g.cm ⁻³)	Relação C/N
Esterco	38,22	0,68	10,29
Restos de podas e varrição	10,62	0,13	24,68
Maravalha	12,31	0,09	178,27

Para preparar as diferentes misturas, os resíduos orgânicos tiveram seus volumes medidos, em seguida eles foram adicionados a um saco de polietileno, onde foram agitados até a sua homogeneização. A mistura de resíduos foi colocada em uma estrutura cilíndrica de tela plástica (125mm) e madeira, com dimensões de 38cm de diâmetro, 58cm de altura, a estrutura foi preenchida com 56L de resíduos orgânicos (figura 1). Após a homogeneização, cada parcela experimental foi umedecida lentamente para evitar a formação de caminhos preferenciais de escoamento da água no composto.



Figura 1. Dimensões e estrutura da parcela experimental utilizada no estudo onde foi realizada a compostagem em pequena escala com diferentes proporções de resíduos orgânicos.

O revolvimento durante o período de compostagem foi realizado quinzenalmente, com o intuito de favorecer a oxigenação da parte mais interna do composto e aumentar sua homogeneidade. A manutenção da umidade foi feita com adição de água logo após cada revolvimento. Para garantir as condições ideais no processo, o teor de umidade foi averiguado e mantido sempre em torno de 50%. Para a determinação da umidade foram coletadas amostras de cada parcela experimental, posteriormente elas foram secas em estufa de circulação forçada de ar por 48h a 65 °C. Diariamente foi aferida a temperatura no interior do composto com o auxílio de um termômetro de mercúrio, além disso a temperatura ambiente máxima e mínima foram coletadas.

Amostras representativas do composto foram coletadas aos 11, 39, 67 e 95 dias para a determinação do pH em água, condutividade elétrica, teor de matéria orgânica total e teores de carbono orgânico total e nitrogênio total. Para determinação do pH em água e condutividade elétrica foram seguidas as metodologias propostas por Tedesco *et al.* (1995), com adaptações. Cinco gramas de composto foram adicionados a 50 ml de água destilada, posteriormente a mistura foi agitada em mesa agitadora durante uma hora e deixada de repouso por cinco minutos, a leitura do pH e condutividade elétrica (CE) foi feita no sobrenadante. O teor de matéria orgânica (MO) foi feito por determinação direta através da calcinação de amostras secas a 550 °C durante 4h, após o resfriamento das amostras em dessecador, elas foram pesadas e o teor de MO foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\text{MO (\%)} = 100 * (\text{Po} - \text{P}) / \text{Po}.$$

Onde Po e P são o peso inicial da amostra previamente seca e o peso final após calcinação, respectivamente (Kiehl, 1985).

O carbono orgânico total (COT) do composto foi determinado a partir da oxidação de 0,05g de amostra seca e finamente moída com dicromato de potássio, seguido de digestão em bloco digestor por 30 minutos e determinação por titulação com sulfato ferroso amoniacal (Mendonça e Matos, 2005). O nitrogênio total foi determinado pelo método da destilação do nitrogênio em um destilador de Kjeldahl (Mendonça e Matos, 2005). A relação entre carbono e nitrogênio (C/N) foi obtida pela razão entre o teor de carbono e o teor de nitrogênio.

Os dados obtidos foram coletados ao longo do tempo, portanto, a análise estatística dos dados foi feita no esquema de parcelas subdividas no tempo, o que significa que foi realizada análise de regressão linear simples e quadrática para avaliar o comportamento das variáveis resposta obtidas em cada tratamento ao longo do tempo de compostagem. Para a determinação do melhor modelo de regressão foram utilizados como parâmetros a significância dos coeficientes de regressão, a análise de variância dos modelos e $R^2 > 0,7$. Ainda, foi realizado o teste de Tukey para comparação das médias entre cada tratamento no mesmo tempo amostragem. Os resultados também foram analisados por abordagem multivariada a partir da análise de componentes principais (ACP). Para todos os testes foi considerado o nível de 5% de significância. Todas as análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2017), para a realização das análises de regressão e dos testes de médias foi utilizado o pacote "ExpDes.pt" (Ferreira *et al.*, 2014) e para realizar a análise de componentes principais foi utilizado o pacote "AnaliseMultivariada".

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temperatura

A fase inicial do processo de compostagem é caracterizada pelo aumento da temperatura até valores próximos de 70°C, essa fase é chamada de termofílica e tem como característica a intensa atividade microbiana e alta decomposição da matéria orgânica (Kiehl, 2010). Nesse estudo, nenhum dos tratamentos atingiu essa temperatura, no entanto nos primeiros três dias a temperatura das pilhas de compostagem foi superior a temperatura ambiente, o que também pode indicar um aumento da atividade microbiana inicial, posteriormente a temperatura do composto se manteve próxima a temperatura

ambiente (figura 2). A condução da compostagem em temperatura baixas não é indicativo de que não haja atividade microbiana, mas sim de que o calor gerado pelo metabolismo microbiano não conseguiu ser conservado na pilha devido ao seu pequeno tamanho. Segundo Barrena *et al.* (2006), em escala piloto, a temperatura da compostagem diminui rapidamente quando a matéria orgânica facilmente degradável é totalmente consumida.

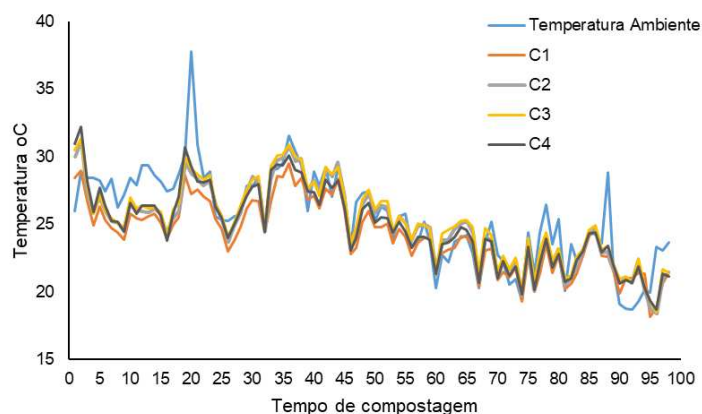


Figura 2. Temperatura alcançada por compostos orgânicos preparados com diferentes proporções de resíduos e temperatura ambiente.

Matéria orgânica

A maior presença de resíduos vegetais é diretamente proporcional ao teor de matéria orgânica, ou seja, quanto maior a presença desse tipo de resíduo no composto, maior o seu teor de matéria orgânica (figura 3-A, tabela 3-A), esse comportamento também foi observado por Guidoni *et al.* (2018). O aumento no tempo de compostagem no tratamento com menor proporção de resíduos vegetais (C1) não alterou o seu teor de MO, permanecendo na média de 38,6%. Nos demais tratamentos o teor de MO decresceu ao longo do tempo, até tenderem a se estabilizar aproximadamente a partir dos 85 dias de compostagem. Com exceção de C1, a taxa de perda de matéria orgânica final em relação a inicial é muito próxima entre os tratamentos, cerca de 33,7, 37,9 e 32,6% para C2, C3 e C4, respectivamente. Com aumento no tempo de decomposição o teor de MO tende a se aproximar entre os tratamentos, de modo que no final da compostagem C1 e C2 obtiveram mesmos valores médios assim como C2 e C3.

O acompanhamento da evolução da MO durante a compostagem é um importante indicativo sobre a transformação e a mineralização dos nutrientes (Zhang *et al.*, 2019). A degradação da matéria orgânica total foi mais expressiva até os 39 dias de compostagem, desde então a degradação da MO foi mais sutil, evidenciando o esgotamento da MO de fácil decomposição, permanecendo materiais mais recalcitrantes (Zhang *et al.*, 2017). A taxa de mineralização da MO também está sujeita à composição físico-química dos materiais, principalmente a concentração de fibras, especialmente a lignina (Kulikowska, 2016). Isso também explica o teor de MO superior nos tratamentos com maior inclusão da maravalha, um material rico em compostos recalcitrantes, como a lignina, esses compostos são de difícil degradação, o que contribui para o aumento do tempo de compostagem (Zhou *et al.*, 2015). Como o processo de decomposição da MO é causado diretamente pelas atividades de respiração microbiana, é

bem provável que os tratamentos onde a degradação da MO foi mais efetiva houve maior atividade de microrganismos (Kulcu, 2016).

pH

Os valores de pH de todos os tratamentos ficaram na faixa de 7 a 8,4, no entanto o comportamento dessa variável ao longo do tempo de decomposição foi afetado pelas diferentes composições de resíduos orgânicos (tabela 3-A). O menor valor de pH foi observado em C1, 7,5, que tendeu a diminuir linearmente ao longo do tempo, mantendo o menor valor até o final da compostagem. Foi observado um comportamento quadrático nos outros tratamentos, onde o pH tendeu a aumentar até atingir o seu valor máximo aproximadamente entre os 44 e 52 dias, a partir daí o pH tende a diminuir chegando próximo aos patamares iniciais, com exceção de C2 que atingiu um valor final de pH estatisticamente igual ao C1 (figura 3 - B).

O comportamento do pH observado nas misturas C2, C3 e C4 está relacionado com a degradação da matéria orgânica durante o período de compostagem. No período inicial da compostagem, até os 40 dias, a degradação da matéria orgânica foi mais intensa, esse comportamento é caracterizado pela hidrólise de proteínas e de outras fontes de nitrogênio orgânico, levando a formação de amônia e promovendo a elevação do pH (Sánchez-Monedero *et al.*, 2001; Raj e Antil, 2011). O comportamento da mistura C1 foi peculiar em relação as demais misturas, a queda constante do pH observada em C1 pode ser consequência da baixa taxa de degradação da matéria orgânica, além disso, a redução constante no seu teor de NT pode ser um indicativo da degradação de amônia e a liberação de H⁺ no meio (Wang *et al.*, 2017).

Condutividade elétrica

De um modo geral, o aumento do tempo de decomposição do composto proporcionou a diminuição da condutividade elétrica. Na fase inicial da compostagem, até os 11 dias de decomposição, os valores de condutividade elétrica não foram influenciados pelas composições de resíduos orgânicos na compostagem. A partir do 39º dia de decomposição foi observado que os tratamentos com maiores proporções de resíduos vegetais apresentaram menores valores de condutividade elétrica, além disso, a redução da condutividade elétrica ao longo do tempo é maior quando há maior inclusão de agentes de volume na compostagem (tabela 3-A). Os tratamentos C3 e C4 apresentaram comportamento quadrático, iniciando com valores médios de CE de 1,1mS/cm, decrescendo até se estabilizarem aproximadamente aos 92 dias, por outro lado, os tratamentos C1 e C2 seguiram tendência linear, mas com C2 com uma taxa de decréscimo maior do que C1, esse por sua vez teve seu valor final pouco afetado pelo tempo de decomposição, partindo de 1,1mS/cm e atingindo o valor mínimo de 0,82mS/cm (figura 3-C). Os resultados encontrados nesses estudos são condizentes com os encontrados por Mohee *et al.* (2015).

A CE é um indicativo do grau de salinidade do composto, sendo diretamente relacionado ao quanto ele pode afetar negativamente o crescimento de plantas (Zhang e Sun, 2016). No início da compostagem os valores de CE já se apresentavam abaixo do limite máximo, o que não acarretaria prejuízos para o cultivo de plantas, de acordo com Karak *et al.* (2013) esse limite é de 4mS/cm. Ainda

assim, os resultados mostraram que a compostagem pode reduzir os valores de CE, provavelmente pela lixiviação de íons solúveis, liberação de ácidos orgânicos oriundos da decomposição da matéria orgânica (Mattei *et al.*, 2016) e pelo processo de humificação, onde pequenas moléculas de ácidos e sais orgânicos são complexados com grandes moléculas e transformadas em húmus (Chen *et al.*, 2017). A CE apresentou um comportamento oposto ao pH, os tratamentos que apresentaram maior CE apresentaram menor pH e vice-versa, o que está de acordo com os resultados encontrados por Zhang e Sun (2015).

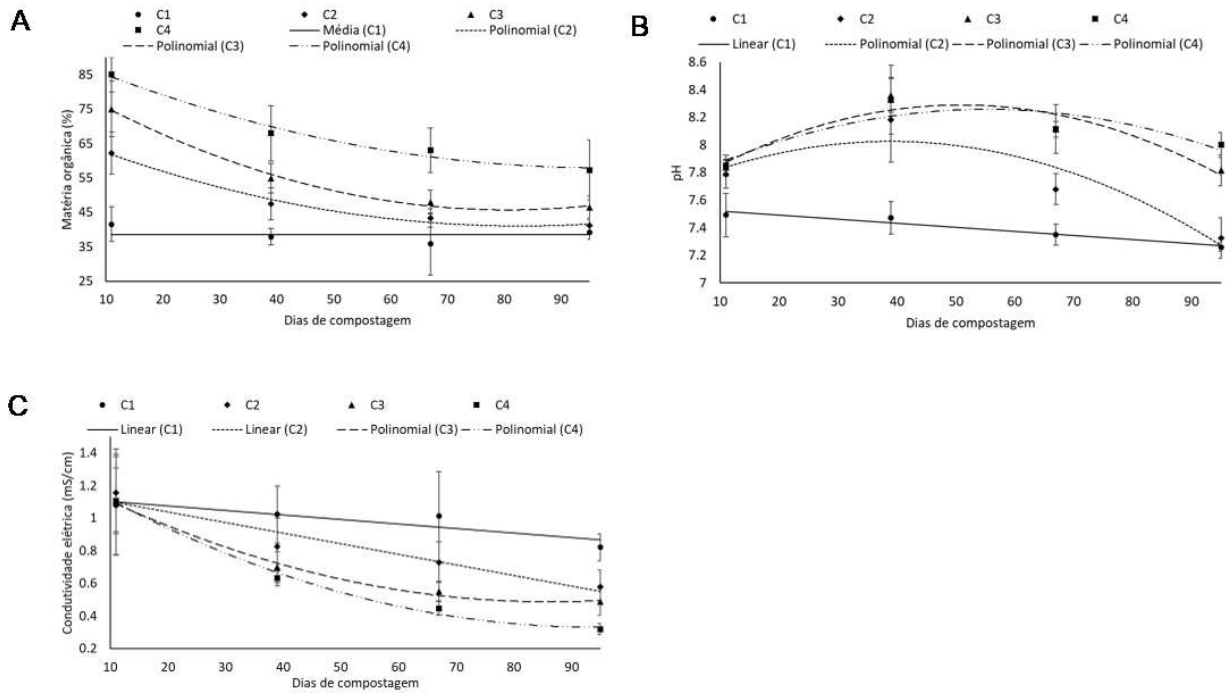


Figura 3. Dispersão gráfica e estudo de regressão do teor de matéria orgânica (A), pH (B) e condutividade elétrica (C) de compostos orgânicos produzidos com diferentes proporções de resíduos em função do número de dias da compostagem.

Tabela 3 - A. Valores médios para condutividade elétrica (CE), pH, matéria orgânica total (MO), suas respectivas equações de regressão e R² analisados ao longo do tempo de compostagem (11, 39, 67 e 95 dias).

Variável resposta	Tratamento	Tempo				Equação	R ²
		11	39	67	95		
MO(%)	C1	41,59 d	37,88 d	35,79 c	39,14 c	ns	
	C2	62,22 c	47,50 c	43,33 b	41,18 bc	$y=68,629-0,665x^{***}+0,004x^2^{***}$	0,987
	C3	75,06 b	54,87 b	47,99 b	46,55 b	$y=84,543-0,964x^{***}+0,006x^2^{***}$	0,994
	C4	85,02 a	67,96 a	63,11 a	57,31 a	$y=91,576-0,695x^{***}+0,0036x^2^{***}$	0,980
pH	C1	7,49 b	7,47 b	7,35 c	7,26 b	$y=7,549 - 0,0029x^{***}$	0,942
	C2	7,79 a	8,18 a	7,68 b	7,33 b	$y=7,662+0,0187^{***}-0,0002x^2^{***}$	0,853
	C3	7,84 a	8,36 a	8,12 a	7,82 a	$y=7,613+0,0266x^{***}-0,0003x^2^{***}$	0,876
	C4	7,85 a	8,33 a	8,11 a	8,00 a	$y=7,683+0,0208x^{***}-0,0002x^2^{***}$	0,743
CE (mS/cm)	C1	1,08 a	1,02 a	1,01 a	0,82 a	$y=1,132-0,0028x^{**}$	0,810
	C2	1,16 a	0,82 ab	0,73 b	0,58 b	$y=1,168-0,0065x^{**}$	0,930
	C3	1,10 a	0,70 b	0,55 bc	0,49 bc	$y=1,279-0,0184x^{***}+0,0001x^2^{**}$	0,994
	C4	1,11 a	0,63 b	0,45 c	0,32 c	$y=1,311-0,0209x^{***}+0,0001x^2^{***}$	0,992

Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância. ns – não significativo ($p>0.05$), **, *** significativo de 1 e 0.1%, respectivamente.

Carbono orgânico total, nitrogênio total e relação C/N

Assim como o teor de MO, o teor de carbono orgânico total aumentou com o aumento da proporção de resíduos vegetais na compostagem. Durante todo o período avaliado, o tratamento C4 manteve teores superiores aos demais, mesmo tendo uma queda acentuada no teor de COT a partir do 11º dia, essa tendência se manteve até aproximadamente o dia 70, depois disso foi observado um aumento da concentração de COT no meio. Com exceção de C1, os demais tratamentos apresentaram queda praticamente constante no teor de COT, até atingirem o mesmo valor médio ao final da compostagem. O tratamento C1 apresentou menores teores de COT, que se mantiveram praticamente estáveis ao longo do tempo (tabela 3-B, figura 4-A).

A humificação e a mineralização da matéria orgânica durante a compostagem tem como consequência a redução do teor de COT, uma vez que parte do carbono é transformado em CO₂ e outras substâncias inorgânicas (Zhang e Sun, 2016).

De modo contrário ao teor de COT e MO, maiores proporções de resíduos vegetais contribuíram para a diminuição do teor de nitrogênio total. Apenas os tratamentos C1 e C4 apresentaram modificação dessa variável ao longo do tempo, nessas duas composições de resíduos o comportamento dessa variável foi oposto. Enquanto que no tratamento C1 o teor de NT tende a cair a uma taxa constante até o fim da compostagem, em C4 o NT tende a aumentar até aproximadamente os 57 dias, quando começa a diminuir, mas ainda assim mantém um valor superior ao inicial. Com exceção de C4 todos os tratamentos evoluíram para chegar a um valor final de NT estatisticamente iguais (tabela 3-B, figura 4-B).

A realização de compostagem com misturas ricas em nitrogênio, como é o caso de C1, é caracterizada pela elevada perda de nitrogênio para a atmosfera devido a degradação mais rápida desses componentes pelos microrganismos (Gigliotti *et al.*, 2012). De acordo com Nakhshiniev *et al.* (2014) a presença de maiores teores de carbono orgânico, principalmente em formas mais complexas e de lenta degradação como compostos lignocelulósicos, diminui as perdas de nitrogênio na compostagem. Além disso, quanto menor o conteúdo inicial de NT na compostagem, menor será a perda de nitrogênio (Ekinci *et al.*, 2019). De fato, nesse estudo quanto maior a inclusão de materiais vegetais nas misturas de compostagem e, portanto, maior relação C/N, menor foi a perda de nitrogênio. Segundo Michel Jr. *et al.* (2014) o NT tem um comportamento inverso à relação C/N e COT, enquanto essas variáveis diminuem ao longo do tempo, o teor de nitrogênio tende a aumentar.

Com exceção de C1, o teor de NT tende a aumentar ao longo do tempo. Grande parte das proteínas contidas na mistura de compostagem não são degradadas no processo (Körner e Stegmann, 2002). Além disso a taxa de degradação do nitrogênio é menor do que a do carbono (Chan *et al.*, 2016), havendo uma redução da massa total da pilha provocada pela mineralização da matéria orgânica e liberação de CO₂, como resultado há um efeito de concentração de nitrogênio (Huang *et al.*, 2004). Apesar de haver um ligeiro acréscimo no NT em C2 e C3, esse aumento não foi significativo.

A relação C/N é um índice importante para avaliar a maturidade do composto (Guo *et al.*, 2012). O tratamento C4 apresentou um comportamento peculiar quanto a relação C/N, enquanto que nos demais tratamentos essa variável tendeu a diminuir até que seus valores se igualassem ao final do período de

compostagem, a relação C/N em C4 decresceu até atingir seu valor mínimo aos 68 dias, a partir disso tendeu a se estabilizar em um valor próximo a 26 (tabela 3-B, figura 4-C). Apesar de representar uma redução expressiva na relação C/N no início da compostagem, o seu valor final foi relativamente alto, indicando a presença de grande quantidade de carbono na forma de substâncias complexas e de difícil degradação.

A taxa de mineralização do nitrogênio é menor do que a do carbono orgânico, isso faz com que a relação C/N diminua ao longo do tempo (Yang *et al.*, 2013). No entanto, no tratamento C1 não houve modificações significativas da relação C/N, tendo o valor médio de $10,97 \pm 0,99$, isso pode indicar a baixa disponibilidade de substrato para a atuação de microrganismos. Segundo Swarnam *et al.* (2016), o composto orgânico atinge sua maturação com a relação C/N abaixo de 15 e nessa fase a atividade microbiana é mais baixa e, portanto, as modificações na matéria orgânica são reduzidas (Yang *et al.*, 2013).

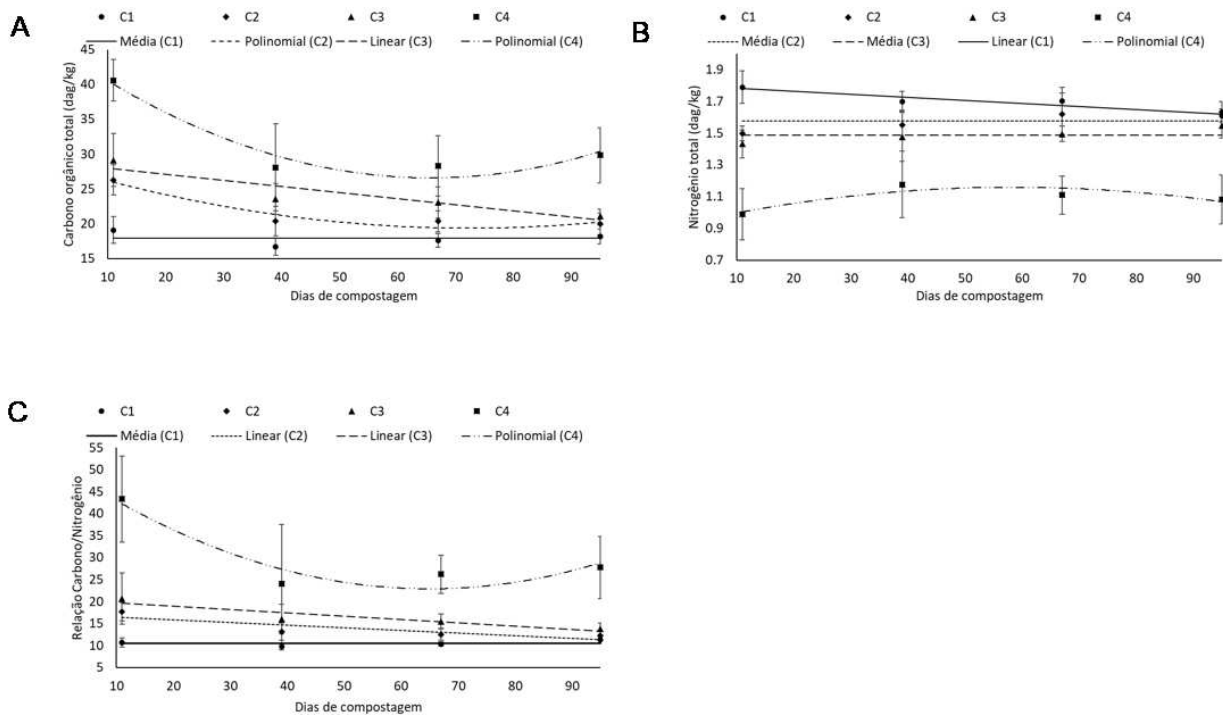


Figura 4. Dispersão gráfica e estudo de regressão do teor de carbono orgânico total (A), nitrogênio total (B) e relação C/N (C) de compostos orgânicos produzidos com diferentes proporções de resíduos em função do número de dias da compostagem.

Tabela 3 -B. Valores médios para carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e relação C/N (C/N), suas respectivas equações de regressão e R² analisados ao longo do tempo de compostagem (11, 39, 67 e 95 dias).

Variável resposta	Tratamento	Tempo				Equação	R ²
		11	39	67	95		
COT(%)	C1	19,10 c	16,67 c	17,62 c	18,18 b	ns	
	C2	26,28 b	20,38 b	20,34 bc	19,94 b	$y=28,545-0,259x^{***}+0,0018x^2^{***}$	0,930
	C3	29,15 b	23,57 b	23,05 b	21,15 b	$y=28,869-0,0876x^{***}$	0,846
	C4	40,60 a	28,08 a	28,30 a	29,83 a	$y=45,968-0,589x^{***}+0,0045x^2^{***}$	0,939
NT(%)	C1	1,79 a	1,70 a	1,70 a	1,61 a	$y=1,801-0,0019x^{**}$	0,888
	C2	1,50 b	1,55 ab	1,62 ab	1,63 a	ns	
	C3	1,43 b	1,48 b	1,49 b	1,55 a	ns	
	C4	0,99 c	1,18 c	1,11 c	1,08 b	$y=0,923+0,0081x^{**}-0,0001x^2^{**}$	0,765
C/N	C1	10,69 c	9,82 c	10,36 b	11,33 b	ns	
	C2	17,63 b	13,19 bc	12,56 b	12,23 b	$y=17,0888-0,601x^{**}$	0,746
	C3	20,66 b	15,99 b	15,47 b	13,75 b	$y=20,487-0,0758x^{***}$	0,862
	C4	43,31 a	24,06 a	26,23 a	27,75 a	$y=50,874-0,861x^{***}+0,0066x^2^{***}$	0,895

Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância. ns – não significativo ($p>0.05$), **, *** significativo de 1 e 0.1%, respectivamente.

A Análise de Componentes Principais possibilitou avaliar a relação entre as proporções de resíduos utilizados na compostagem, as variáveis respostas obtidas com o experimento e o seu comportamento ao longo do tempo. Na figura 5 são apresentadas graficamente as correlações dos componentes principais (PCA) e as variáveis resposta, onde setas próximas entre si e apontadas para a mesma direção indicam correlação positiva entre essas variáveis e setas que apontam para lados opostos indicam correlação negativa. Quanto mais próxima do centro do gráfico, menor a correlação entre a variável e o componente principal. Os dois primeiros eixos dos componentes principais foram capazes de representar 89,46% da variação total dos dados.

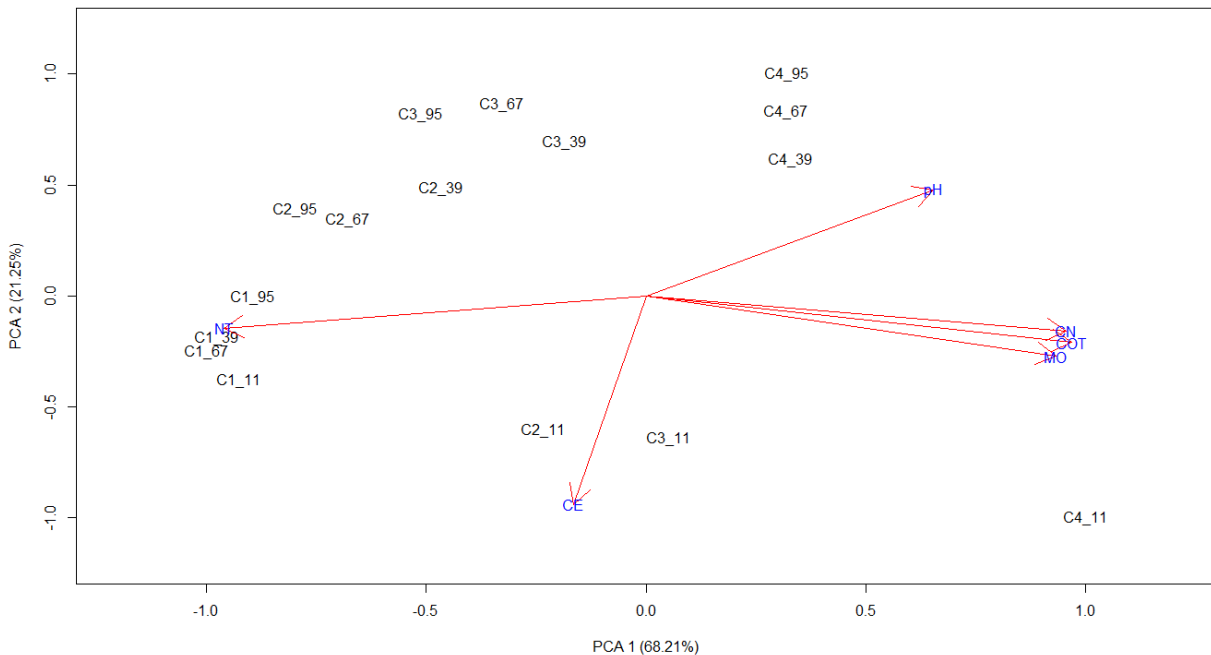


Figura 5. Dispersão gráfica dos dois primeiros Componentes Principais de características físico-químicas em compostagem com diferentes proporções de resíduos aos 11, 39, 67 e 95 dias de compostagem.

A relação C/N do composto está fortemente associada ao teor de matéria orgânica, sendo que quanto maior a relação C/N, maior será a quantidade de matéria orgânica. Um comportamento semelhante, porém, menos intenso é observado com o pH, este tende a aumentar quando há aumento na relação C/N e no teor de matéria orgânica do composto. A condutividade elétrica, por sua vez, se comportou de forma independente das outras variáveis, estando mais associada ao tempo de decomposição. Independentemente do tipo de resíduo, quanto maior o tempo de decomposição, menor será a condutividade elétrica.

Os tratamentos C1 e C4 apresentaram comportamentos opostos, enquanto que os tratamentos C2 e C3 se comportaram de maneira intermediária. O tratamento C1 apresentou os maiores teores de NT durante todo o período de compostagem, enquanto que C4 apresentou alta relação com as variáveis MO, COT, CN e pH.

Em C2 e C3 o aumento do tempo de compostagem é acompanhado pela redução nos teores de COT, MO, CN e no pH e, inversamente a essas variáveis é observado um aumento no teor de NT. Enquanto que em C1 a redução das variáveis COT, MO, CN, pH e aumento do NT ocorre até

aproximadamente os 55 dias de decomposição, o mesmo comportamento é observado mais tardiamente em C4, somente após 70 dias, indicando uma decomposição mais lenta.

CONCLUSÕES

As diferentes composições de resíduos afetam o desenvolvimento do processo de compostagem ao longo do tempo. Foi descoberto que a inclusão de agentes de volume contribui para a concentração de NT no composto enquanto que a baixa inclusão desses materiais pode favorecer a perda desse nutriente.

A inclusão de agentes de volume auxilia na redução da condutividade elétrica ao longo do tempo de compostagem, sendo recomendada a inclusão de maior quantidade de agente de volume em resíduos com alto grau de salinidade.

O aumento da inclusão desse tipo de resíduo, acima dos níveis especificados na mistura C3, apresentou um composto com elevada relação C/N mesmo findado o período de compostagem, o que pode inviabilizar sua utilização agrônômica em alguns casos.

REFERÊNCIAS

- Barrena, R., Canovas, C., Sánchez, A. 2006. Prediction of temperature and thermal inertia effect in the maturation stage and stockpiling of a large composting mass. *Waste Management*. **26**: 953–959.
- Chan, M. T., Selvam, A., Wong, J. W.C. 2016. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment. *Bioresource Technology*. **200**: 838–844.
- Chen, W., Liao, X., Wu, Y., Liang, J. B., Mi, J., Huang, J., Zhang, H., Wu, Y., Qiao, Z., Li, X., Wang, Y. 2017. Effects of different types of biochar on methane and ammonia mitigation during layer manure composting. *Waste Management*. **61**: 506–515.
- Ekinci, K., Tosun, I., Bitrak, B., Kumbul, B. S., Şevik, F., Sülük, K. 2019. Effects of initial C/N ratio on organic matter degradation of composting of rose oil processing solid wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*. **16**: 5131–5140.
- Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P., Nogueira, D. A. 2014. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. *Applied Mathematics*, **5**: 2952-2958.
- Faverial, J., Boval, M., Sierra, J., Sauvart, D. 2016. End-product quality of composts produced under tropical and temperate climates using different raw materials: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*. **183**: 909-916.
- Gigliotti, G., Proietti, P., Said-Pullicino, D., Nasini, L., Pezzolla, D., Rosati, L., Porceddu, P. R. 2012. Co-composting of olive husks with high moisture contents: Organic matter dynamics and compost quality. *International Biodeterioration & Biodegradation*. **67**: 8-14.
- Guidoni, L. L. C., Marques, R. V., Moncks, R. B., Botelho, F. T., da Paz, M. F., Corrêa, L. B., Corrêa, É. K. 2018. Home composting using different ratios of bulking agent to food waste. *Journal of Environmental Management*. **207**: 141-150.

- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y. 2012. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*. **112**: 171–178.
- Huang, G.F., Wong, J.W.C., Wu, Q.T., Nagar, B.B. 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Management*. **24**: 805–813.
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank. Washington, DC.
- Karak, T., Bhattacharyya, P., Paul, R. K., Das, T., Saha, S. K. 2013 Evaluation of composts from agricultural wastes with fish pond sediment as bulking agent to improve compost quality. *Clean – Soil, Air, Water*. **41 (7)**: 711–723.
- Kiehl, E. J. 1985. *Fertilizantes orgânicos*. Editora Agronômica Ceres, São Paulo.
- Kiehl, E. J. 2010. *Novo fertilizantes orgânicos*. 1ª edição. Editora Degaspari, Piracicaba.
- Körner, I., Stegmann, R., 2002. N-dynamics during composting - overview and experimental results. In: Insam, H., Riddech, N., Klammer, S. (Eds.), *Microbiology of Composting*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 143e154.
- Kulikowska, D. 2016. Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting. *Waste Management*. **49**: 196–203.
- Kulcu, R. 2016. New kinetic modelling parameters for composting process. *J Mater Cycles Waste Manag*. **18**: 734–741.
- Mattei, P., Cincinelli, A., Martellini, T., Natalini, R., Pascale, E., Renella, G. 2016. Reclamation of river dredged sediments polluted by PAHs by co-composting with green waste. *Science of the Total Environment*. **566–567**: 567–574.
- Mendonça, E. S., Matos, E. S. 2005. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. Editora UFV, Viçosa.
- Michel Jr., F. C., Pecchiaab, J. A., Rigot, J., Keener, H. M. 2014. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Science & Utilization*. **12(4)**: 323-334.
- Mohee, R., Boojhawon, A., Sewhoo, B., Rungasamy, S., Somaroo, G. D., Mudhoo, A. 2015. Assessing the potential of coal ash and bagasse ash as inorganic amendments during composting of municipal solid wastes. *Journal of Environmental Management*. **159**: 209-217.
- Muscolo, A., Papalia, T., Settineri, G., Mallamaci, C., Jeske-Kaczanowska A. 2018. Are raw materials or composting conditions and time that most influence the maturity and/or quality of composts? Comparison of obtained composts on soil properties. *Journal of Cleaner Production* **195**: 93-101.

- Nakhshiniev, B., Perera, C., Biddinika, M. K., Gonzales, H. B., Sumida, H., Yoshikawa, K. 2014. Reducing ammonia volatilization during composting of organic waste through addition of hydrothermally treated lignocellulose. *International Biodeterioration & Biodegradation*. **96**: 58-62.
- Oliveira, L. S. B. L., Oliveira, D. S. B. L., Bezerra, B. S., Pereira, B. S., Battistelle, R. A. G. 2017. Environmental analysis of organic waste treatment focusing on composting scenarios. *Journal of Cleaner Production* 155: 229-237.
- R CORE TEAM. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em URL: <http://www.r-project.org/>.
- Raj, D., Antil, R. S. 2011. Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*. **102**: 2868–2873.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Paredes, C., Bernal, M. P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*. **78**: 301-308.
- Swarnam, T. P., Velmurugan, A., Pandey, S. K., Roy, S. D. 2016. Enhancing nutrient recovery and compost maturity of coconut husk by vermicomposting technology. *Bioresource Technology*. **207**: 76–84.
- Tedesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H., Volkweiss, S. J. 1995. Análises de solo, plantas e outros materiais. **2.ed.** Porto Alegre: Departamento de solos da UFRGS.
- Wang, S. -P., Zhong, X. -Z., Wang, T. -T., Sun, Z. -Y., Tang, Y. -Q., Kida, K. 2017. Aerobic composting of distilled grain waste eluted from a Chinese spiritmaking process: The effects of initial pH adjustment. *Bioresource Technology*. **245**: 778–785.
- Yang, F., Li, G. X., Yang, Q. Y., Luo, W. H. 2013. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere*. **93**: 1393–1399.
- Zhang, L., Sun, X. 2015. Effects of earthworm casts and zeolite on the two-stage composting of green waste. *Waste Management*. **39**: 119–129.
- Zhang, L., Sun, X. 2016. Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc. *Bioresource Technology*. **218**: 335–343.
- Zhang, L., Zeng, G., Dong, H., Chen, Y., Zhang, J., Yan, M., Zhu, Y., Yuan, Y., Xie, Y., Huang, Z. 2017. The impact of silver nanoparticles on the co-composting of sewage sludge and agricultural waste: Evolutions of organic matter and nitrogen. *Bioresource Technology*. **230**: 132–139.
- Zhang, L., Zhu, Y., Zhang, J., Zeng, G., Dong, H., Cao, W., Fang, W., Cheng, Y., Wang, Y., Ning, Q. 2019. Impacts of iron oxide nanoparticles on organic matter degradation and microbial enzyme activities during agricultural waste composting. *Waste Management*. **95**: 289–297.
- Zhou, C., Liu, Z., Huang, Z., Dong, M., Yu, X., Ning, P. 2015. A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: Addition of different inocula at three stages of composting. *Waste Management*. **40**: 38–43.

Zhou, Y., Selvam, A., Wong, J. W.C. 2014. Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues. *Bioresource Technology*. **168**: 229–234.

Zhou, Y., Selvama, A., Wong, J. W. C. 2018. Chinese medicinal herbal residues as a bulking agent for food waste composting. *Bioresource Technology*. **249**: 182–188.

4.2 Artigo 2 – Uso do método de seleção de variáveis *Best-subsets* para estimar relação C/N no processo de compostagem

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico Scientia Agricola.

Uso do método de seleção de variáveis *Best-subsets* para estimar relação C/N no processo de compostagem

RESUMO

A relação C/N é um dos critérios mais importantes na compostagem e a sua mensuração é importante para a definição de manejos e determinação da maturidade do composto. Métodos indiretos, mais rápidos e mais práticos do que os métodos tradicionais para obtenção da relação C/N podem ajudar no planejamento e aumento da eficiência na produção. O objetivo desse trabalho foi construir um método prático de estimativa indireta da relação C/N utilizando equações lineares e quadráticas selecionadas através do método de seleção de variáveis dos melhores subconjuntos de regressão (*Best-subsets*). Estimativas da relação C/N foram obtidas utilizando os parâmetros: pH, condutividade elétrica (CE), matéria orgânica (MO) e tempo de compostagem (T). Os resultados mostraram que com apenas o teor de matéria orgânica como única variável preditora é possível estimar a relação C/N, com um R^2 ajustado acima de 0,9, mas ao se acrescentar a variável tempo há ganhos na qualidade da predição. Dessa forma, as variáveis matéria orgânica e tempo foram mais selecionadas nos subconjuntos de regressão, indicando o quanto essas variáveis estão relacionadas com a relação C/N. O método de seleção de modelos de regressão *Best-subsets* se mostrou uma ferramenta eficaz na seleção de modelos eficientes e compactos. Do ponto de vista estatístico o melhor modelo para estimativa da relação C/N foi obtido ao se considerar as variáveis MO, pH e CE, no entanto, ao se considerar um modelo de simples aplicação e que apresente bons indicadores o mais adequado seria utilizando apenas as variáveis T e MO.

Palavras-chave: modelo estatístico, regressão múltipla, predição de índices.

INTRODUÇÃO

A compostagem é um processo controlado de decomposição biológica da matéria orgânica em um ambiente aeróbio. É um dos métodos mais difundidos para atenuar os efeitos da crescente geração de resíduos orgânicos no mundo (Lim *et al.*, 2016). O composto orgânico é o material obtido com o processo de compostagem, é um material seguro e que apresenta características benéficas para ser aplicado ao solo quando maduro e estável (Guo *et al.*, 2012; Watteau e Villemin, 2011).

A avaliação da maturidade do composto pode envolver a análise de vários fatores, não há um consenso quanto a utilização de um único índice para definição de sua maturidade (Onwosi *et al.*, 2017). Ainda assim a relação C/N é um dos principais fatores que estão relacionados com essa característica (Wang *et al.*, 2017). Há divergências quanto ao valor exato de relação C/N para o estabelecimento da maturidade do composto. A maioria dos estudos sugerem que são aceitáveis valores abaixo de 20, mas que valores menores do que 15 são recomendados para a utilização agrônômica do composto (Raj e Antil, 2011; Swarnam *et al.*, 2016). Apesar de não haver um consenso quanto a um valor absoluto, a redução da relação C/N ao longo do tempo de compostagem é um indicativo de que o composto orgânico está atingindo sua maturidade e estabilidade (Iqbal *et al.*, 2015).

Nesse sentido a determinação da relação C/N do composto é um importante parâmetro que deve ser acompanhado durante o processo de compostagem, podendo ser utilizado para a determinação do grau de maturidade e acompanhamento da qualidade do composto orgânico.

O uso de técnicas matemáticas e estatísticas para estimativa de índices e variáveis importantes relacionadas à compostagem constituem uma ferramenta eficaz para auxiliar na compreensão e otimização do processo de compostagem (Onwosi *et al.*, 2017). A utilização de métodos com esse objetivo tem sido aplicados na estimativa de emissão de gases em compostagem (Boniecki *et al.*, 2012; Oudart *et al.*, 2015), quantidade de biomassa, oxigênio e dióxido de carbono contidos no composto (Vasiliadou *et al.*, 2015), degradação de carbono (Villaseñor *et al.*, 2012), perda de calor no processo de compostagem (Boniecki *et al.*, 2013), teor de umidade (Lin *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2015) e conteúdo de nutrientes (Huang *et al.*, 2011).

A análise de regressão é um dos métodos mais difundidos para analisar a relação entre variáveis. A análise de diversas variáveis explicativas é comum em vários tipos de estudos, normalmente nesses casos, pretende-se compreender a relação dessas variáveis com uma única variável resposta, nesses casos a análise de regressão múltipla tem sido empregada (Chung *et al.*, 2020). No entanto, a presença de diversas variáveis a serem analisadas cria o desafio de selecionar as melhores para a aplicação no melhor modelo de regressão.

Os métodos de seleção de variáveis visam selecionar um subconjunto de variáveis explicativas, candidatas a preditoras, para a aplicação no melhor modelo de regressão, otimizando algum critério estatístico, reduzindo sua complexidade sem perder eficiência explicativa (Chung *et al.*, 2020). Burgel e Anzanello (2018) relatam que conseguiram reduzir o número de variáveis preditoras além de obter melhores ajustes de regressão utilizando o método *Best-subsets*.

O método de seleção de variáveis *Best-subsets* é baseado em estimar critérios estatísticos para todos os modelos possíveis, avaliando modelos de todos os tamanhos, contendo desde uma, até todas as variáveis candidatas a preditoras. São formados subconjuntos para cada tamanho, estes contêm as melhores variáveis explicativas, os modelos são selecionados dentro de cada subconjunto pela menor soma de quadrados residual (King, 2003). Não foi encontrado nenhum artigo científico que utilizou o método *Best-subsets* na seleção de variáveis preditoras e para seleção de equações múltiplas aplicadas ao processo de compostagem.

O objetivo desse trabalho foi construir um método de estimativa indireta da relação C/N utilizando equações de primeiro e segundo grau selecionadas através do método de seleção de variáveis dos melhores subconjuntos de regressão (*Best-subsets*).

MATERIAIS E MÉTODOS

Delineamento experimental

A experimentação foi conduzida em casa de vegetação no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG) em Montes Claros - MG, nos meses de fevereiro a junho de 2019, compreendendo um período de 98 dias de compostagem. Os materiais de compostagem incluíram esterco bovino, restos de podas e varrição e, maravalha de perobeira. A caracterização das matérias primas quanto à umidade, densidade e relação C/N segue na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização das matérias primas utilizadas no processo de compostagem com diferentes proporções de resíduos orgânicos de origem animal e vegetal.

Resíduo	Umidade (%)	Densidade (g.cm ⁻³)	Relação C/N
Esterco	38,22	0,68	10,29
Restos de podas e varrição	10,62	0,13	24,68
Maravalha	12,31	0,09	178,27

O desenho experimental utilizado foi o delineamento inteiramente casualizado com quatro tratamentos (C1, C2, C3 e C4), constituídos por diferentes proporções de resíduos orgânicos de origem animal e vegetal, e oito repetições, totalizando 32 parcelas experimentais. A descrição das proporções de cada tipo de resíduo utilizado em cada tratamento está apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização dos tratamentos C1, C2, C3 e C4 quanto ao nível de inclusão (dm³) de resíduos orgânicos de origem animal e vegetal.

Resíduo	Volume de resíduos em cada tratamento (dm ³)			
	C1	C2	C3	C4
Esterco	43 (76,8%)	22,8 (40,7%)	12,6 (22,5%)	6,5 (11,6%)
Restos de podas e varrição	6,5 (11,6%)	16,6 (29,6%)	21,7 (38,8%)	24,75 (44,2%)
Maravalha	6,5 (11,6%)	16,6 (29,6%)	21,7 (38,8%)	24,75 (44,2%)
Total	56	56	56	56

Em um primeiro momento, os resíduos advindos de podas e varrição foram triturados com desintegrador. Todos os resíduos foram misturados em sacos de polietileno até sua homogeneização, posteriormente a mistura de resíduos foi colocada em uma estrutura cilíndrica de tela plástica (125mm) e madeira, com dimensões de 38cm de diâmetro, 58cm de altura e com capacidade para 56dm³ (figura 1). Após acondicionados, cada parcela experimental foi umedecida lentamente para evitar a formação de caminhos preferenciais de escoamento da água no composto.

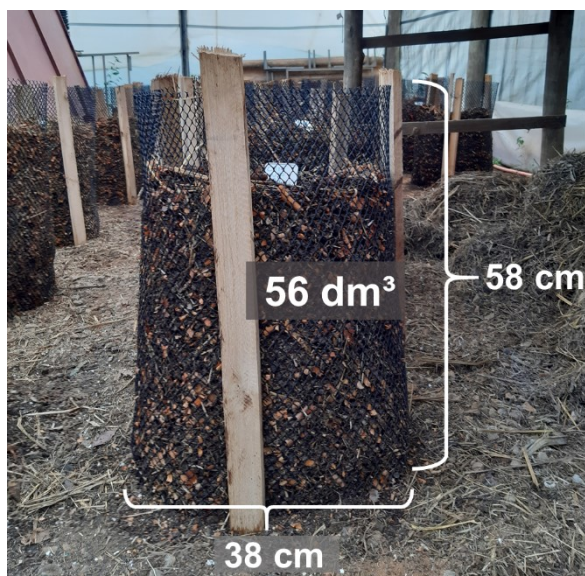


Figura 1. Dimensões e estrutura da parcela experimental utilizada no estudo onde foi realizada a compostagem em pequena escala com diferentes proporções de resíduos orgânicos.

Análises laboratoriais

Ao total foram utilizadas 128 amostras representativas do composto, coletadas aos 11, 39, 67 e 95 dias. Foi determinado o pH em água, condutividade elétrica (CE), teor de matéria orgânica total (MO) e relação carbono nitrogênio (C/N). As análises feitas com amostras frescas foram CE e pH, essas variáveis foram medidas com o auxílio de um condutivímetro e pHmetro, respectivamente. Após a diluição de cinco gramas de composto em 50mL de água destilada, a mistura foi agitada em mesa agitadora durante uma hora e deixada de repouso por cinco minutos, a leitura do pH e condutividade elétrica (CE) foi feita diretamente no sobrenadante (Tedesco *et al.*, 1995). A MO foi estimada por determinação direta através da calcinação de amostras secas a 550 °C durante 4h, após o resfriamento das amostras em dessecador, elas foram pesadas e o teor de MO foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\text{MO (\%)} = 100 * (\text{Po} - \text{P}) / \text{Po}.$$

Onde Po e P são o peso inicial da amostra previamente seca e o peso final após calcinação, respectivamente (Kiehl, 1985).

A relação C/N real foi obtida pela razão entre o teor de carbono orgânico total e nitrogênio total. Para a análise desses nutrientes as amostras de composto foram secas em estufa de circulação de ar a 65°C por 48h e moídas em cadinho para passarem em uma malha de 0,2 mm. A determinação do carbono orgânico total foi realizada a partir da oxidação de 0,05g de amostra com dicromato de potássio, seguido de digestão em bloco digestor por 30 minutos e determinação por titulação com sulfato ferroso amoniacal (Mendonça e Matos, 2005). O nitrogênio total foi determinado pelo método da destilação do nitrogênio em um destilador de Kjeldahl (Mendonça e Matos, 2005).

Seleção de variáveis e confecção dos modelos de regressão

As variáveis MO, pH, CE e tempo após o início da compostagem (T) foram utilizadas como variáveis candidatas a preditoras da relação C/N estimada. Foram testados vários modelos de regressão

que levaram em consideração o efeito linear e quadrático de cada variável preditora, o efeito do intercepto não foi levado em consideração em nenhum modelo.

O seguinte modelo matricial foi utilizado para as análises de regressões simples e múltiplas:

$$Y = X\beta + \varepsilon.$$

Onde Y representa a relação C/N, possuindo dimensões $n \times 1$, cujos componentes correspondem as n respostas. X é a matriz modelo, contendo as variáveis preditoras (MO, pH, CE e T), com dimensão igual a $n \times p$, o número de parâmetros (p) considerados em cada modelo variou de um até oito. β é a matriz contendo os coeficientes de regressão, possuindo dimensões $p \times 1$ e, ε é o vetor de dimensões $n \times 1$, cujos componentes são os erros.

A seleção dos modelos de regressão foi feita pelo método dos melhores subconjuntos (*Best-subsets*). Esse método agrupa as equações por números de parâmetros consideradas no modelo, criando os subconjuntos. Cada subconjunto contém as “ k ” melhores equações selecionadas. O critério adotado para a seleção dos melhores modelos em cada subconjunto é a menor soma de quadrados residual (S^2) (King, 2003). As quatro variáveis candidatas a preditoras (MO, pH, CE e T) foram avaliadas quanto a inclusão de seu efeito linear (x) e quadrático (x^2), portanto, 8 parâmetros foram usados para o processo de seleção *Best-subsets*.

O número de modelos avaliados é dado por:

$$2^p - 1.$$

Onde p é o número de parâmetros avaliados (variáveis candidatas a preditoras) (Heinze *et al.*, 2018; Ruengvirayudh e Brooks, 2016).

Como nesse estudo foram considerados 8 parâmetros candidatos a preditores, foram avaliados 255 modelos, divididos em 8 subconjuntos. Cada subconjunto é correspondente ao tamanho dos modelos, isto é, o número de parâmetros incluídos. Dentro de cada subconjunto, os modelos são comparados entre si quanto a soma de quadrados residual, o número k de modelos com menor soma de quadrado residual são selecionados (figura 2). Sendo assim é possível obter o melhor modelo contendo uma variável resposta, duas e assim sucessivamente até o valor p . O último subconjunto conterá todas as variáveis candidatas a preditoras, sendo o modelo mais completo e, portanto, esse subconjunto conterá apenas um modelo por ser o único possível. Nesse estudo foi adotado o valor de $k=2$, ao final da seleção do algoritmo *Best-subsets* foram selecionados 15 modelos de regressão.

Após essa filtragem inicial, os modelos de regressão podem ser avaliados individualmente por outros critérios estatísticos como Estatística C_p de Mallows (C_p), R^2 ajustado (R^2_{aj}) e critério de informação Bayesiano (BIC), o que auxilia na escolha do melhor modelo. A utilização desses parâmetros pode auxiliar na escolha do modelo mais parcimonioso. Além disso, outros critérios podem ser levados em consideração pelo pesquisador, como conhecimento prévio da natureza dos dados, facilidade de obtenção da variável preditora, etc.

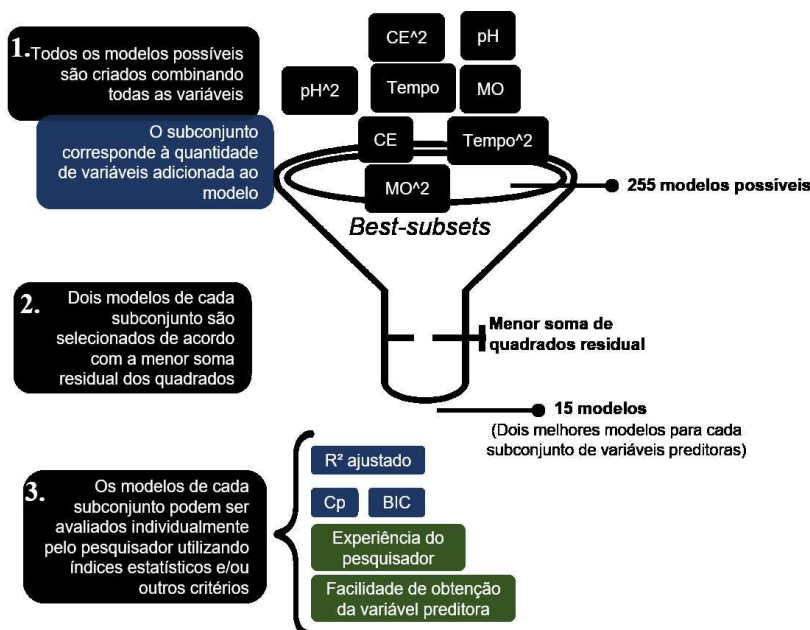


Figura 2. Fluxo esquemático da seleção de variáveis predictoras para estimativa da relação C/N em compostagem de resíduos agropecuários utilizando o algoritmo *Best-subsets*.

A aplicação do método dos melhores subconjuntos foi realizada no software R (versão 1.1.463) utilizando o pacote *leaps*, versão 3.1. A significância estatística dos índices de regressão foi detectada ao nível de 1%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método de regressão de melhores subconjuntos selecionou os dois melhores modelos, para subgrupos de variáveis independentes, levando em consideração a inclusão sucessiva de variáveis predictoras, gerando modelos com um a quatro variáveis independentes, mas por levar em consideração o efeito simples e quadrático de cada uma dessas variáveis, o número total de parâmetros pode ser de um a oito, gerando um total de 15 modelos de regressão (tabela 3).

Tabela 3. Valores de Cp de Mallows (Cp), R² ajustado (R² aj), soma de quadrados residual (S²) e critério de informação Bayesiano (BIC) para os respectivos modelos de regressão considerando diferentes números de parâmetros (N) e as melhores variáveis predictoras (parâmetros) para estimativa da relação C/N em compostagem.

Modelo	N	Parâmetros	Cp	R ² aj	S ²	BIC
1	1	MO	55,287	0,9133	4484,677	-309,1326
2	1	MO ²	73,902	0,9044	4945,173	-296,6212
3	2	T, MO ²	13,084	0,9339	3391,166	-340,0556
4	2	T ² , MO ²	14,910	0,9330	3436,34	-338,3618
5	3	T, CE, MO ²	12,478	0,9346	3326,715	-337,6597
6	3	T, CE ² , MO ²	12,635	0,9346	3330,582	-337,511
7	4	MO, T ² , MO ² , pH ²	10,666	0,9360	3232,41	-336,4886
8	4	T, MO, pH, MO ²	10,871	0,9359	3237,469	-336,2884

9	5	MO, pH, CE, T ² , MO ²	8,265	0,9376	3123,543	-336,0218
10	5	T, MO, pH, CE, MO ²	8,817	0,9374	3137,197	-335,4636
11	6	MO, pH, CE, MO ² , pH ² , CE ²	4,193	0,9402	2973,315	-337,479
12	6	MO, pH, CE, T ² , MO ² , CE ²	7,816	0,9384	3062,946	-333,6774
13	7	T, MO, pH, CE, MO ² , pH ² , CE ²	6,031	0,9397	2969,321	-332,799
14	7	MO, pH, CE, T ² , MO ² , pH ² , CE ²	6,089	0,9397	2970,749	-332,7375
15	8	T, MO, pH, CE, T ² , MO ² , pH ² , CE ²	8,000	0,9393	2968,551	-327,9802

O método dos melhores subconjuntos seleciona as variáveis candidatas a preditoras capazes de prever a variável dependente de acordo com o número de parâmetros, portanto ao selecionar apenas uma variável, do ponto de vista do método, essa é a mais relacionada com a variável dependente (King, 2003). A análise dos modelos selecionados revela que as principais variáveis que descrevem a relação C/N na compostagem orgânica são a MO e T. Nesse estudo, especialmente o teor de MO é a variável que mais contribui para a estimativa da relação C/N por estar presente no modelo levando em consideração apenas uma variável. Além disso nenhum dos modelos selecionados excluiu o teor de MO, indicando a importância dessa variável na estimativa da relação C/N.

O processo de degradação da MO está estreitamente relacionado com a relação C/N, diferentes relações C/N podem ocasionar diversos processos de decomposição, alterando os processos bioquímicos na compostagem (Wang *et al.*, 2019). O aumento na degradação da MO pode contribuir para o aumento do nitrogênio total, ocasionando a diminuição da relação C/N (Wang e Witarisa, 2016). Essa relação estreita entre os dois índices pode ser explicada pela atividade dos microrganismos no substrato. A quantidade disponível de carbono e nitrogênio controla a atividade e o desempenho dos microrganismos, uma vez que eles são os responsáveis pela degradação da MO e também pelo processo de humificação (Truong e Marschner, 2018).

A importância da MO no processo de compostagem, não se limita apenas aos nutrientes C e N. Huang *et al.* (2011) testaram as seguintes variáveis preditoras para determinação dos teores de N, P, K, Cu, Zn: densidade específica, matéria seca, condutividade elétrica e pH. Ao considerar apenas uma variável preditora, o melhor desempenho foi obtido com a matéria seca, regressões múltiplas obtiveram melhores resultados ao considerar matéria seca e pH, obtendo R² de 0,86 para N, 0,93 para P, 0,95 para K, 0,90 para Cu e 0,91 para Zn. A matéria seca está diretamente relacionada com a MO, indicando que essa variável é importante não somente para a determinação de elementos essenciais às plantas como N e C, mas também para P, K, Cu, Zn.

A segunda variável que mais esteve presente nos modelos selecionados foi o tempo de decomposição (T). O tempo de decomposição exerce um efeito indireto na estabilização do composto orgânico, uma vez que ele é resultado da interação de diversos outros parâmetros no processo de compostagem. Critérios como fornecimento de oxigênio, seja por aeração forçada ou revolvimentos, condições ambientais, atividade de microrganismos (Costa *et al.*, 2016) e umidade por exemplo, podem contribuir para diminuir ou aumentar o tempo de decomposição e estabilização do composto. O tempo de decomposição e estabilização do composto orgânico tende a ser maior para materiais com elevada

relação C/N, esses materiais permanecem mais tempo na compostagem, enquanto que materiais com baixa relação C/N se degradam com maior facilidade e tendem a atingirem a maturidade primeiro (Zhou, 2016).

Quanto menor a soma dos quadrados residuais (S^2), melhor será o modelo, ou seja, menor será a variação dos dados atribuída ao erro (Hofmann *et al.*, 2007). De acordo com esse parâmetro, o melhor modelo foi aquele que considerou todas as variáveis independentes (modelo 15), ou seja, todos os oito parâmetros. Há uma tendência de redução do S^2 a medida que o número de parâmetros é aumentado (figura 3-C), o que pode ocasionar a seleção de modelos superajustados com grande número de variáveis. O R^2 ajustado é um bom indicativo do ajuste do modelo de regressão e leva em consideração o número de parâmetros do modelo. O valor de R^2 ajustado pode diminuir caso as variáveis adicionadas ao modelo contribuam pouco para a estimativa da variável resposta. Isso contribuiu para a escolha de modelos mais parcimoniosos (Hair *et al.*, 2009).

Todos os modelos testados apresentaram bons ajustes de regressão, mesmo o modelo mais simples, considerando apenas uma variável independente apresentou R^2 ajustado acima de 0,9. Esse índice aumentou à medida que mais parâmetros foram adicionados ao modelo, até ao se adicionar seis variáveis, quando tendeu a diminuir ligeiramente (figura 3 – B), de acordo com esse parâmetro o melhor modelo foi o 11.

O coeficiente C_p de Mallows também leva em consideração o número de parâmetros adicionados ao modelo. O melhor modelo é aquele em que o valor de C_p seja próximo ao número de parâmetros, dando-se preferência a valores menores (King, 2003). Comumente esse índice é utilizado na avaliação de modelos de regressão por identificar problemas de superajustes relacionados com o número de parâmetros considerados no modelo de regressão (James *et al.*, 2013). Nesse estudo, a inclusão de parâmetros ao modelo reduz o valor de C_p , no entanto, a partir da inclusão de seis parâmetros o C_p tende a aumentar ligeiramente (figura 3 – A), de acordo com esse índice o melhor modelo foi o modelo 11, com a inclusão de 6 parâmetros. Assim como o C_p , valores de BIC baixos são desejáveis na seleção de modelos (Leal *et al.*, 2015), de acordo com esse critério o melhor modelo foi o 3, esse modelo leva em consideração apenas dois parâmetros, o que é vantajoso do ponto de vista prático.

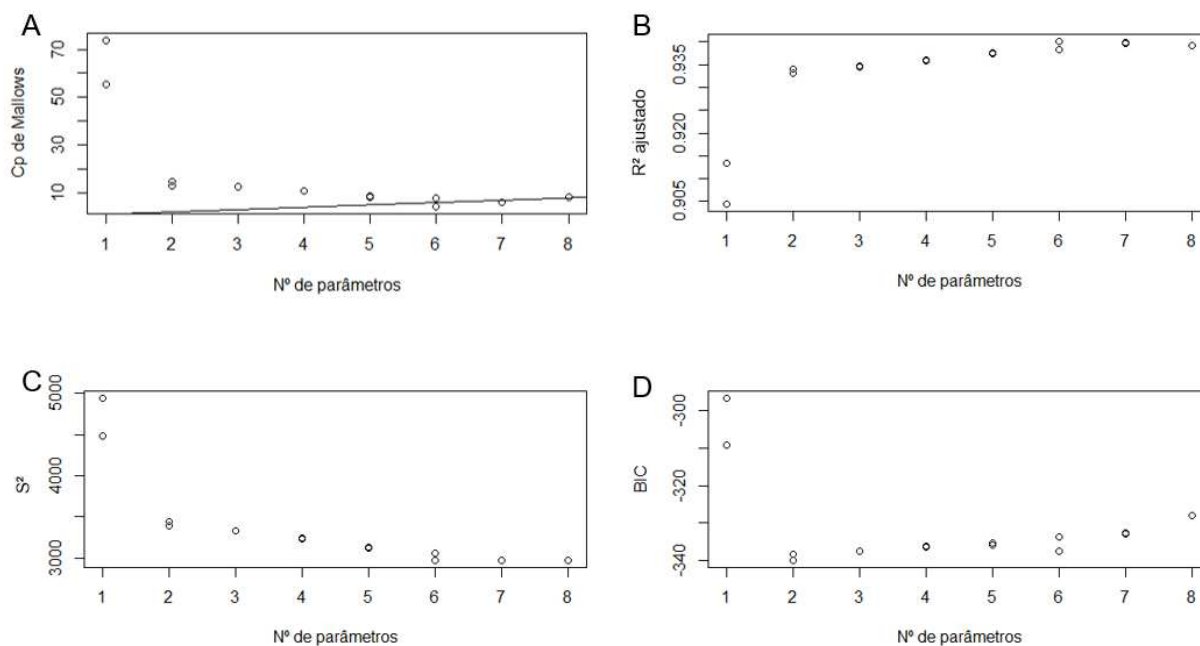


Figura 3. Valores de estatística Cp de Mallows (A), R^2 ajustado (B), soma de quadrados residual (C) e critério de informação Bayesiano (D) em função do número de parâmetros adicionados aos modelos de regressão selecionados pelo método *Best-subsets* para estimativa da relação C/N em compostagem.

É importante considerar o viés estatístico na escolha do melhor modelo, com parâmetros altamente significativos, também é importante levar em consideração modelos mais compactos e robustos (Guimarães *et al.*, 2020). Além disso, é interessante que o modelo seja de fácil aplicação prática e que apresente parâmetros de fácil determinação no campo e com boa acurácia em relação as observações reais do objeto de estudo (Soares *et al.*, 2015).

O modelo 3 leva em consideração o tempo de compostagem (T) e o teor de matéria orgânica (MO), duas informações de fácil obtenção. Modelos com variáveis de fácil mensuração no campo merecem destaque por viabilizarem a sua aplicação prática (Guimarães *et al.*, 2020). Em comparação com o modelo 11, o modelo 3 permite estimar a relação C/N de maneira mais prática e objetiva, porque exige apenas a obtenção do tempo de compostagem e do teor de matéria orgânica. O modelo 11 exige, além da MO, a obtenção da CE e do pH do material orgânico. Assim, a obtenção da MO juntamente com o tempo de decomposição, permitem estimar de maneira eficiente a relação C/N do fertilizante orgânico, podendo ser utilizado como parâmetro para determinação da maturidade do composto, auxiliando no planejamento da produção de compostagem orgânica.

De acordo com os critérios analisados o melhor modelo é o modelo 11, por apresentar melhores valores de Cp e R^2 ajustado. No entanto, o modelo 3 apresentou melhor valor de BIC e ganha destaque por considerar um número menor de variáveis, ainda assim esse modelo apresenta um ótimo R^2 aj (0,9339), muito próximo do modelo 11, que foi de 0,9402 (tabela 4), o que faz os dois modelos relativamente precisos.

Tabela 4. R² ajustado e respectivas equações para estimativa da relação C/N em compostagem.

Modelo	Função	R ² ajustado
3	$0,0603T^{***}+0,00486MO^{2***}$	0,9339
11	$-0,708MO^{**}+9,463pH^{***}-26,091CE^{***}+0,01MO^{2***}-0,606pH^{2**}+10,286CE^{2**}$	0,9402

** e *** significativo a 1 e 0.1%, respectivamente.

A dispersão dos dados da relação C/N observada e a estimada pelos modelos 3 e 11 são apresentados na figura 4, observa-se que a maioria dos dados se concentra próximo a linha correspondente à razão 1:1, que representa um cenário perfeito onde os valores estimados são exatamente iguais aos valores observados. Observa-se que não houve diferenças expressivas quanto a qualidade preditiva das duas equações, no entanto o modelo 3 apresenta um número menor de variáveis predictoras, sendo mais simplificado. Apesar da ótima qualidade preditiva dos modelos aplicados nesse estudo, ainda existem limitações da aplicação generalizada desses modelos devido a heterogeneidade do composto orgânico e os diferentes materiais que podem ser utilizados na sua fabricação, sendo recomendado novas investigações com diferentes composições de resíduos.

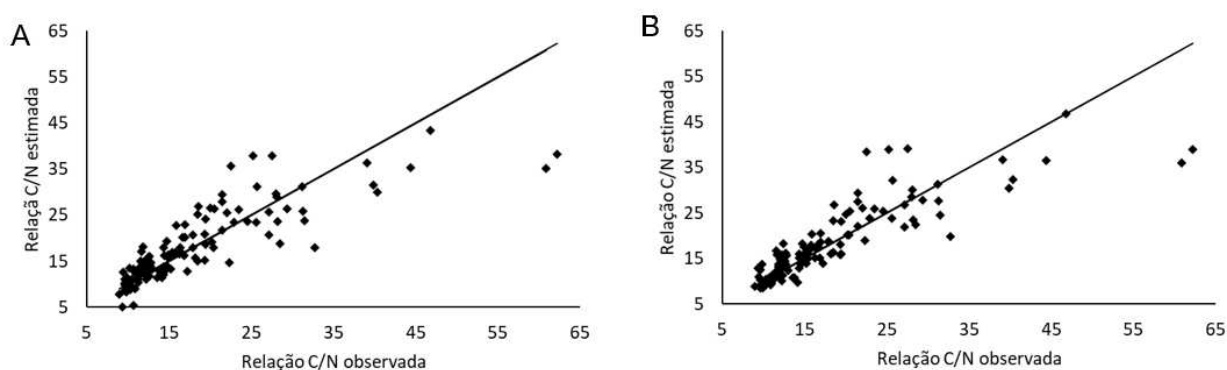


Figura 4. Dispersão de dados entre relação C/N observada e relação C/N estimada utilizando o modelo de regressão 3 (A) e modelo de regressão 11 (B) para estimativa da relação C/N em compostagem.

CONCLUSÃO

Os modelos de regressão obtidos através da seleção dos melhores subconjuntos são recomendados para o planejamento e acompanhamento do processo de compostagem por serem de fácil aplicação e apresentarem uma margem de precisão aceitável.

Embora o modelo 11 apresente melhores índices estatísticos (C_p, R² ajustado e S²), o modelo 3 apresentou o melhor BIC, com apenas dois parâmetros e facilidade de obtenção prática. Portanto, é recomendado para estimativas da relação C/N durante o processo de compostagem orgânica.

REFERÊNCIAS

- Boniecki, P.; Dach, J.; Mueller, W.; Koszela, K.; Przybyl, J.; Pilarski, K.; Olszewski, T. 2013. Neural prediction of heat loss in the pig manure composting process. *Applied Thermal Engineering* 58: 650-655.
- Boniecki, P.; Dach, J.; Pilarski, K.; Piekarska-Boniecka, H. 2012. Artificial neural networks for modeling ammonia emissions released from sewage sludge composting. *Atmospheric Environment* 57: 49-54.

- Burgel, E.; Anzanello, M.J. 2018. Approach to Selecting Predictive Variables in the Context of Inventory Control. *Revista Gestão Industrial* 14: 154-195 (in Portuguese, with abstract in English).
- Chung, S.; Park, Y.W.; Cheong, T. 2020. A mathematical programming approach for integrated multiple linear regression subset selection and validation. *Pattern Recognition* 108: 107565.
- Costa, M.S.S.M.; Carneiro, L.J.; Costa, L.A.M.; Pereira, D.C.; Lorin, H.E.F. 2016. Composting time reduction of agro-industrial wastes. *Engenharia Agrícola* 36(6): 1206-1217.
- Guimarães, B.V.C.; Donato, S.L.R.; Aspiazú, I.; Azevedo, A.M.; Carvalho, A.J. 2020. Regression models for productivity prediction in cactus pear cv. Gigante. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24(11): 721-727.
- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y. 2012. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*. 112: 171-178.
- Hair, J.F.; Black, W.C.; Babin, B.J.; Anderson, R.E.; Tatham, R.L. 2009. *Multivariate Data Analysis, Seventh Edition*. Pearson Education, New Jersey, USA.
- Heinze, G.; Wallisch, C.; Dunkler, D. 2018. Variable selection – A review and recommendations for the practicing statistician. *Biometrical Journal* 60: 431-449.
- Hofmann, M.; Gatu, C.; Kontoghiorghes, E.J. 2007. Efficient algorithms for computing the best subset regression models for large-scale problems. *Computational Statistics & Data Analysis* 52: 16–29.
- Huang, G.; Wang, X.; Han, L. 2011. Rapid estimation of nutrients in chicken manure during plant-field composting using physicochemical properties. *Bioresource Technology* 102: 1455–1461.
- Iqbal, M.K.; Nadeem, A.; Sherazi, F.; Khan, R.A. 2015. Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12:1759–1768.
- James, G.; Witten, D.; Hastie, T.; Tibshirani, R. 2013. *An Introduction to Statistical Learning, with Applications in R*. Springer, New York, NY, USA.
- Kiehl, E.J. 1985. *Organic Fertilizers. = Fertilizantes orgânicos*. Editora Agronômica Ceres, São Paulo, Brazil (in Portuguese).
- King, J.E. 2003. Running a best-subsets logistic regression: an alternative to stepwise methods. *Educational and Psychological Measurement* 63(3): 392-403.
- Leal, A.J.F.; Miguel, E.P.; Baio, F.H.R.; Neves, D.C.; Leal, U.A.S. 2015. Artificial neural networks in the prediction of corn yield and definition of differentiated management sites through soil attributes. *Bragantia* 74: 436-444 (in Portuguese, with abstract in English).
- Lim, S.L., Lee, L.H., Wu, T.Y. 2016. Sustainability of using composting and vermicomposting Technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production* 111: 262-278.

- Lin, C.; Wei, C.-C.; Tsai, C.-C. 2016. Prediction of influential operational compost parameters for monitoring composting process. *Environmental Engineering Science* 33(7): 494-507.
- Mendonça, E.S.; Matos, E.S. 2005. Soil organic matter: analysis methods. = Matéria orgânica do solo: métodos de análises. Editora UFV, Viçosa, MG, Brazil (in Portuguese).
- Onwosi, C.O.; Igbokwe, V.C.; Odimba, J.N.; Eke, I.E.; Nwankwoala, M.O.; Iroh, I.N.; Ezeogu, L.I. 2017. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management* 190: 140-157.
- Oudart, D.; Robin, P.; Paillat, J.M.; Paul, E. 2015. Modelling nitrogen and carbon interactions in composting of animal manure in naturally aerated piles. *Waste Management* 46: 588–598.
- Ruengvirayudh, P.; Brooks, G.P. 2016. Comparing Stepwise Regression Models to the Best-Subsets Models, or, the Art of Stepwise. *General Linear Model Journal* 42(1): 1-14.
- Raj, D.; Antil, R.S. 2011. Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology* 102: 2868–2873.
- Soares, F.C.; Robaina, A.D.; Peiter, M.X.; Russi, J.L. 2015. Prediction of corn crop productivity using an artificial neural network. *Ciência Rural* 45(11): 1987-1993 (in Portuguese, with abstract in English).
- Swarnam, T.P.; Velmurugan, A.; Pandey, S. K.; Roy, S. D. 2016. Enhancing nutrient recovery and compost maturity of coconut husk by vermicomposting technology. *Bioresource Technology* 207: 76–84.
- Tedesco, M.J.; Gianello, C.; Bissani, C.A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S.J. 1995. Analysis of soil, plants and other materials. Second revised and expanded edition. = Análises de solo, plantas e outros materiais. Segunda edição revisada e ampliada. Departamento de solos da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil (in Portuguese).
- Truong, T.H.H.; Marschner, P. 2018. Respiration, available N and microbial biomass N in soil amended with mixes of organic materials differing in C/N ratio and decomposition stage. *Geoderma* 319: 167–174.
- Vasiliadou, I.A.; Chowdhury, A.K.M.M.B.; Akrotos, C.S.; Tekerlekopoulou, A.G.; Pavlou, S.; Vayenas, D.V. 2015. Mathematical modeling of olive mill waste composting process. *Waste Management* 43: 61–71.
- Villaseñor, J.; Mayor, L.R.; Romero, L.R.; Fernández, F.J. 2012. Simulation of carbon degradation in a rotary drum pilot scale composting process. *Journal of Environmental Management* 108: 1-7.
- Wang, L.; Li, Y.; Prasher, S.O.; Yan, B.; Ou, Y.; Cui, H.; Cui, Y. 2019. Organic matter, a critical factor to immobilize phosphorus, copper, and zinc during composting under various initial C/N ratios. *Bioresource Technology* 289: 121745.
- Wang, X.; Pan, S.; Zhang, Z.; Lin, X.; Zhang, Y.; Chen, S. 2017. Effects of the feeding ratio of food waste on fed-batch aerobic composting and its microbial Community. *Bioresource Technology* 224: 397-404.
- Wang, Y.; Ai, P.; Cao, H.; Liu, Z. 2015. Prediction of moisture variation during composting process: A comparison of mathematical models. *Bioresource Technology* 193: 200–205.

Wang, Y.; Witarsa, F. 2016. Application of Contois, Tessier, and first-order kinetics for modeling and simulation of a composting decomposition process. *Bioresource Technology* 220: 384–393.

Watteau, F.; Villemin, G. 2011. Characterization of organic matter microstructure dynamics during co-composting of sewage sludge, barks and green waste. *Bioresource Technology* 102: 9313–9317.

Zhou, J.-M. 2016. The effect of different C/N ratios on the composting of pig manure and edible fungus residue with rice bran. *Compost Science & Utilization* 25(2): 120-129.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diferentes composições de resíduos se comportaram de maneira diferencial ao longo do processo de compostagem. Foi descoberto que a inclusão de agentes de volume contribui para a concentração de NT no composto enquanto que a baixa inclusão desses materiais pode favorecer a perda desse nutriente. No entanto, a inclusão demasiada desse tipo de resíduo apresentou um composto com elevada relação C/N mesmo findado o período de compostagem, o que pode inviabilizar sua utilização agrônômica em alguns casos.

A utilização do *Best-subsets* revelou ser possível a seleção de equações lineares capazes de prever com precisão a relação C/N do composto, a realização de novos estudos incluindo outros tipos de resíduos e também a realização de estudos em grande escala pode auxiliar na validação do método e a sua extrapolação para a estimativa de outras variáveis. Além disso, a utilização de métodos como esse, que exigem pouco poder computacional, pode ser uma alternativa viável e de baixo custo para modernizar o processo convencional de compostagem e auxiliar na tomada de decisões ao longo do processo, contribuindo para a difusão do método e o seu avanço tecnológico a um baixo custo.

APÊNDICE

Tabela 1. Correlações (r) entre os componentes principais (PCA1 e PCA2) e as variáveis avaliadas no composto orgânico produzido com diferentes proporções de resíduos.

Variáveis	PCA1	PCA2
COT	0.9676	-0.2091
NT	-0.9597	-0.1459
CN	0.9556	-0.1579
pH	0.6528	0.4779
CE	-0.1644	-0.9395
MO	0.932	-0.2718