

Recebido em 11/2019. Aceito para publicação em 12/2019.

DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS MECÂNICOS E CARACTERIZAÇÃO POR FTIR DO SOLO DA FAZENDA DO POÇO “JACAREÍ UNIVAP CAMPUS URBANOVA”: UMA AVALIAÇÃO INTEGRADA DA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL

DETERMINATION OF THE MECHANICAL ATTRIBUTES AND FTIR PARTICLE ANALYSIS OF THE SOIL OF “FAZENDA DO POÇO - JACAREÍ CAMPUS URBANOVA UNIVAP”: AN INTEGRATED ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RECOVERY

Douglas Cubas Pereira¹

Reinaldo José dos Santos²

Maria Regina de Aquino-Silva³

Kumiko Koibuchi Sakane⁴

Resumo: O solo é tridimensional e dinâmico formado por partes sólidas, líquidas e gasosas de origem mineral e orgânica que estão ligados a diversos processos ecossistêmicos. A mineração de areia causa inúmeros impactos no solo cuja recuperação necessita de manejo monitoramento dos indicadores de qualidade do solo. No presente trabalho, realizou-se o levantamento dos atributos mecânicos densidade do solo e de partículas, macro, micro e porosidade total de três áreas de manejo na Fazenda do Poço para estabelecer a eficiência do processo de recuperação por meio de avaliação estatística por análise de variância (ANOVA), teste T de Student ($p < 0,05$), correlação de Pearson e avaliação e atribuição aproximada das bandas da estrutura das amostras por espectroscopia no infravermelho médio com Transformada de Fourier com processamento por análise multivariada. O fragmento florestal (A4) apresentou os melhores indicadores físicos, a área A1 apresentou melhores condições que A2, similares à A4. Condições adversas impediram coleta em A3. A macroporosidade e densidade do solo foram os melhores indicadores de degradação. Foi possível atribuir aproximadamente as principais bandas no FTIR e a análise multivariada demonstra a homogeneidade do solo da área. Para reduzir o impacto da compactação é necessário complementar a presença de matéria orgânica, facilitando a ação da biota do solo com enriquecimento de espécies arbóreas com raízes agressivas para mitigar a compactação do solo principalmente em A2.

Palavras-chave: Mineração de areia; atributos mecânicos do solo; recuperação ambiental; indicadores de qualidade do solo; avaliação estatística.

Abstract: The soil is three-dimensional and dynamic, formed by solid, liquid and gaseous parts of mineral and organic origin, that are linked to various ecosystem processes. Sand mining causes numerous impacts on the soil, whose recovery requires management with monitoring of the soil quality indicators. In the present work, the mechanical attributes of soil and particle density, macro, micro and total porosity of 3 areas with different management in Fazenda do Poço were surveyed to establish the efficiency of the recovery process with evaluation by statistical analysis of variance (ANOVA), Student's T-test ($p < 0.05$), Pearson correlation and approximate evaluation of bands from the samples by Fourier Transform mid-infrared spectroscopy with multivariate analysis processing. The forest fragment (A4) presented the best physical indicators, the area A1 presented better conditions than A2, similar to A4. Adverse conditions precluded A3 soil analysis.

¹ Mestrando em Bioengenharia - Universidade do Vale do Paraíba - Univap, Brasil. E-mail: douglas.cubas@hotmail.com.

² Departamento de Engenharia Civil - ITA, Brasil. E-mail: reinaldo@ita.br.

³ Laboratório de Ciências Ambientais - IP&D, Universidade do Vale do Paraíba - Univap, Brasil. E-mail: mregina@univap.br.

⁴ Laboratório de Espectroscopia Vibracional no Infravermelho - IP&D, Universidade do Vale do Paraíba – Univap, Brasil. E-mail: kumiko@univap.br.

Macroporosity and soil density were the best degradation indicators. It was possible to nearly assign the major bands in the FTIR. Multivariate analysis demonstrates the soil homogeneity of the area. To reduce the impact of compaction, it is necessary to complement the presence of organic matter, facilitating the action of the soil biota by direct seeding of tree species with aggressive roots to mitigate soil compaction mainly in A2.

Keywords: Sand mining; soil mechanical attributes; environmental recovery; soil quality indicators; statistical evaluation.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil no Brasil se baseia no uso intensivo de cimento, que exige a utilização de areia mineral que pode ser definida como um material granular com tamanho em intervalo definido de 2 a 0,06 mm, de composição silicática, com predominância do mineral quartzo (BRASIL, 2016). A areia natural é proveniente da influência de processos intempéricos naturais sobre rochas preexistentes, o material sedimentar é deposto nas áreas mais baixas do relevo (várzeas) pela ação da gravidade e do escoamento pluvial e fluvial, os chamados depósitos de planícies fluviais (ALMEIDA; SANCHEZ, 2015).

No Brasil, a areia é obtida por meio de dois tipos principais de processos, dragagem de material sedimentar do leito de rios (90% da produção) e pelo desmonte hidráulico que culmina na formação das chamadas cavas de areia (10% da produção) (BRASIL, 2016). A mineração de areia culmina em diversos impactos como a remoção da camada superficial do solo, afloramento do lençol freático e alterações nas características físicas (mecânicas) do solo que incluem textura, estrutura e distribuição de tamanho de poros que influenciam diversos processos como a infiltração e o escoamento superficial e em conjunto com as singularidades climáticas de uma área podem acentuar processos erosivos (LAL, 1999).

A Fazenda do Poço, localizada entre os municípios de Jacareí e São José dos Campos (SP), foi intensamente explorada por esta atividade, resultando em impactos nos atributos físicos (mecânicos) do solo. Ao ser adquirida em 2003 pela Fundação Vale Paraibana de Ensino iniciou-se a implantação do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) “Conhecer para Conservar” com intuito de cumprir as obrigatoriedades legais para recuperar o ecossistema que foi impactado pela extração de areia. Como os estudos de recuperação de áreas de mineração de areia são recentes o estabelecimento de metodologias de avaliação é fundamental para verificar eficiência do manejo aplicado (ALMEIDA; SANCHEZ, 2015).

O processo de recuperação continua até o presente momento assim como o monitoramento do local com projetos de pesquisa. No presente trabalho foi proposta a realização da análise dos atributos físicos macro, micro e porosidade total, densidade do solo e de partículas das áreas supracitadas pelos procedimentos definidos no Manual de Métodos de análise de Solos da Embrapa (DONAGEMA, 2011) com intuito de observar a evolução do processo de recuperação ambiental na região sobre as características mecânicas do solo.

O trabalho objetivou realizar a análise dos atributos mecânicos do solo densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p), porosidade total (P_T), macroporosidade (M_{ap}) e microporosidade (M_{ip}) de quatro áreas inseridas na Fazenda do Poço, comparar os dados obtidos para as áreas analisadas por meio dos métodos estatísticos de análise de variância (ANOVA), teste T de Student ($p < 0,05$) e correlação de Pearson a fim de identificar qual dos manejos adotados está refletindo melhor evolução no processo de recuperação. As amostras coletadas foram avaliadas por FTIR para verificar a similaridade estrutural do solo da Fazenda do Poço por meio do uso da análise multivariada das principais bandas de absorção dos espectros médios, cálculo das áreas de absorção de caulinita, matéria orgânica, silicatos e óxidos de ferro e atribuição aproximada das principais bandas de FTIR.

2 METODOLOGIA

As áreas de coleta das amostras (figura 1) foram definidas de acordo com a metodologia adotada no estudo de Silva (2016), sendo:

A1 - área com recuperação iniciada em 2005, por meio do plantio de espécies nativas, com aplicação do método de coveamento e adição de nutrientes (NPK 10:10:10), coordenada geográfica 23°12'57.27" latitude sul e 45°57'52.58" longitude oeste;

A2 - área com recuperação iniciada em 2007, por meio de reflorestamento, com aplicação de nutrientes e de solo superficial (*top soil* de 30 cm), coordenada geográfica 23°12'59.72" latitude sul e 45°57'56.33" longitude oeste;

A3 - área com recuperação iniciada em 1990, por meio de reflorestamento homogêneo com Bracatinga (*Mimosa bimucronata*), coordenada geográfica 23°13'20.58" latitude sul e 45°57'56.90" longitude oeste;

A4 - área com remanescente de floresta secundária nativa, coordenada geográfica 23°13'17.81" latitude sul e 45°58'8.27" longitude oeste;

Os dados obtidos em todas as análises dos atributos físicos do solo foram processados estatisticamente com a aplicação da análise de variância com nível de confiança de 95% - $p < 0,05$ (ANOVA) e por meio do teste de T-Student com probabilidade de 5%. A verificação de relação existente entre os atributos físicos e os atributos biológicos e químicos, obtidos em estudo no ano de 2016 (SILVA, 2016), foi estabelecida por meio da análise do coeficiente de correlação de Pearson (r) com uso dos *softwares Excel e Biostat Pro 5.9.8*.

2.1 Coleta do Solo

A retirada das amostras indeformadas (torrões) e deformadas foi realizada de

acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS *et al.*, 2005). Foram coletadas amostras deformadas e em torrões do horizonte A (5-30 cm) com objetivo de caracterizar a densidade do solo. A alta friabilidade do solo e alta presença de raízes não permitiu a coleta na área A3.

2.2 Confeção da Mesa de Tensão

Para a determinação da M_{ip} foi construída uma mesa de tensão a vácuo de 0,006 MPa³ adaptada (SILVA; HERDJANIA, 2008), conforme figuras 1 e 2, com a utilização dos seguintes materiais de baixo custo: 1 Caixa Plástica; 3 Tampas de Canetas Esferográficas; 3 Mangueiras de 0,2 cm de diâmetro; 3 Cilindros de plástico como base para as amostras; 6 Pedras porosas; 6 Anéis de PVC (20 cm³); Tecido *voil* e elásticos; 1 Banco como suporte (60 cm de altura); 1 Proveta de 100 mL.

Figura 1 - Mesa de Tensão.



Fonte: Os autores.

Figura 2 - Amostras na Mesa.



Fonte: O autores.

2.3 Cálculos Adotados

Foram adotados os cálculos dos atributos definidos por Donagema *et al.* (2011).

2.3.1 Determinação da Densidade do Solo (D_s)

Cálculo do teor de umidade percentual pela eq. (1), sendo, U = Umidade percentual; M_s = Massa do solo seco (g) e M_a = Massa da água (g):

$$U = \frac{M_a}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

O peso do torrão foi calculado conforme a eq. (2), sendo, P_{tor} = peso do torrão seco a 105°C (g); a = massa do torrão úmido (g) e b = umidade da subamostra (g.g⁻¹):

$$P_{tor} = \frac{a}{(1 + b)} \quad (2)$$

O volume do torrão foi determinado pela eq. (3), sendo, V_{tor} = Volume do torrão (cm³); a = massa do torrão parafinado (g); b = massa do torrão parafinado mergulhado em água (g) e c = volume da parafina = massa da parafina / 0,90 (cm³):

$$V_{tor} = ((a - b) - c) \quad (3)$$

A densidade do solo foi calculada com a eq. (4), sendo, D_s = densidade do solo

(g.cm⁻³); a = massa do torrão seco a 105°C (g) e b = volume do torrão (cm³):

$$D_s = \frac{a}{b} \quad (4)$$

2.3.2 Determinação da Densidade de Partículas (D_p)

A porcentagem de TSFA foi obtida a partir da eq. (5) (VEIGA, 2011), sendo, TSFA = porcentagem de terra fina seca ao ar; M_{TSFA} = massa de terra fina seca ao ar (g) e M_{Ta} = massa total da amostra (g):

$$TSFA = \frac{M_{TSFA}}{M_{Ta}} \cdot 100 \quad (5)$$

O cálculo de D_s foi feito pela eq. (6), sendo, D_p = densidade de partículas (g.cm⁻³); M_{est} = massa da amostra seca a 105°C (g) e V_{alc} = volume de álcool gasto (cm³):

$$D_p = \frac{M_{est}}{50 - V_{alc}} \quad (6)$$

2.3.3 Determinação da Porosidade Total (P_T), Macroporosidade (M_{ap}) e Microporosidade (M_{ip})

A P_T foi obtida pela relação entre a densidade de partículas e do solo pela eq. (7), sendo, P_T = porosidade total; D_p = densidade de partícula (g.cm⁻³) e D_s = densidade de solo (g.cm⁻³):

$$P_T = \frac{D_p - D_s}{D_s} \cdot 100 \quad (7)$$

As amostras previamente saturadas foram colocadas sobre a mesa de tensão a vácuo (0,006 MPa) por 24 horas para remover a água dos macroporos (□□□□0,05 mm). A relação entre a massa antes e depois de ir à estufa a 105°C possibilita obter o volume de microporos, por meio da eq. (8), sendo, M_{ip} = Microporosidade (cm³.cm⁻³); a = massa da amostra após ser submetida a uma tensão de 60 cm de coluna de água (g); b = massa da amostra seca a 105°C (g) e c = volume do cilindro (cm³):

$$M_{ip} = \frac{a - b}{c} \quad (8)$$

A macroporosidade (M_{ap}) foi obtida subtraindo o volume de microporos da porosidade total obtida por meio da relação entre a D_s e D_p, com a aplicação da eq. (9), sendo, M_{ap} = macroporosidade (m³.m⁻³) e P_t = Porosidade total (m³.m⁻³):

$$M_{ap} = P_T - M_{ip} \quad (9)$$

2.4 Caracterização da Composição do Solo da Fazenda do Poço por FTIR

As amostras de solo foram avaliadas por Espectroscopia no Infravermelho Médio com Transformada de Fourier (FTIR-UATR). O solo coletado das três áreas avaliadas foi colocado para secar em estufa na temperatura de 105°C (DONAGEMA *et al.*, 2011) e peneirados na granulometria de 75 μm que apresenta melhor desempenho para avaliação com FTIR (PEREIRA *et al.*, 2017).

Utilizou-se o espectrofotômetro *Spectrum Two* da *PerkinElmer* para a obtenção de espectros no infravermelho médio (MIR) de 4000 cm^{-1} a 450 cm^{-1} com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras a temperatura ambiente, o processamento foi realizado pelo *software Spectrum 5.2* com correções de linha de base e suavização espectral por meio do algoritmo *Savitsky Golay* com 9 pontos. Foram obtidas as áreas das bandas principais dos espectros médios por meio do *Spectrum 5.2* plotadas em histogramas produzidos no *software Origin Pro 7.5*, os espectros foram submetidos à análise multivariada no *software MiniTab 17* para verificar a similaridade do solo das localidades avaliadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estima-se que a perda mundial anual de solos agricultáveis ocorre a uma taxa de 0,1% ao ano de acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) (TAVARES *et al.*, 2008). Portanto, a recuperação de solo é imprescindível para restabelecer o equilíbrio ecossistêmico e manejo de áreas degradadas. Os atributos físicos D_s , D_p , P_T , M_{ip} e M_{ap} podem indicar o grau de impacto sofrido por um determinado solo e o monitoramento constante é fundamental para estabelecer o sucesso dos planos de recuperação aplicados, bem como para definir quais ações complementares são necessárias para manter a evolução qualitativa dos indicadores.

3.1 Análise da Densidade do Solo (D_s) - Método do Torrão

A densidade do solo das áreas foi obtida por meio do método do torrão (DONAGEMA *et al.*, 2011). A tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 1 - Estatística Descritiva - Densidade do Solo (D_s).

Áreas	A1	A2	A3	A4
Parâmetros	Densidade do Solo (g/cm^3)			
MED (g/cm^3)	1,31	1,46	-	1,24
DP (g/cm^3)	0,02	0,02	-	0,05
CV (%)	1,76	1,05	-	4,06

MED = média; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Fonte: Os autores.

O parâmetro D_s pode ser utilizado como um indicador do índice de grau de compactação de um solo (REICHARDT; TIMM, 2008). Não foi possível determinar a densidade do solo da área A3 por conta da grande presença de areia e raízes no local. A D_s do fragmento florestal A4 ($1,24\text{ g/cm}^3$) foi o melhor valor obtido, resultado esperado

por se tratar de área com menor impacto ambiental típico de solos franco-argiloso-arenosos (BEUTLER et al., 2005). Os valores de A1 e A2 ($1,31 \text{ g/cm}^3$ e $1,46 \text{ g/cm}^3$) confirmam a classificação dos solos como franco-arenosos (SILVA, 2016).

O resultado de D_s sugere que área de plantio de espécies nativas iniciado em 2005 (A1) foi menos impactada pela compactação do que a área com adição de *top soil* e plantio de espécies nativas em 2007 (A2). O coeficiente de variação (CV) apresentou-se entre 1,05 e 4,06% para as médias de D_s , portanto os valores obtidos, abaixo de 10%, estão dentro da faixa ótima de precisão (PIMENTEL-GOMES, 1990).

De acordo com o teste T (tabela 2), apenas entre as áreas A1 e A4 não houve diferença significativa de média para o nível de 95% (valor-P = 0,142). Este resultado demonstra que o manejo realizado em A1 manteve o valor de D_s médio mais próximo ao encontrado no fragmento florestal (A4), o que sugere melhor desempenho do manejo introduzido na área.

Tabela 2 - Teste T Student para D_s .

Áreas Comparadas	Valor - P(T<=t) bi-caudal	Significância (p<0,05)
A1 X A2	0,003	Significante
A1 X A4	0,142	Não Significante
A2 X A4	0,020	Significante

Fonte: Os autores.

3.2 Análise da Densidade de Partículas (D_p) - Método do Balão Volumétrico

Foram realizadas 4 repetições para cada área com intuito de se estabelecer uma boa amostragem da D_p , os valores obtidos são bem uniformes demonstrando similaridades mineralógicas da composição textural do solo da Fazenda do Poço, os valores obtidos estão dispostos na tabela 3.

Tabela 3 - Estatística Descritiva - Densidade de Partículas (D_p).

Áreas	A1	A2	A3	A4
Parâmetros	Densidade de Partículas (g/cm^3)			
MED (g/cm^3)	2,60	2,65	-	2,54
DP (g/cm^3)	0,03	0,03	-	0,06
CV (%)	1,34	1,01	-	2,45

MED = média; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Fonte: Os autores.

A D_p permite a definição da média ponderada das densidades específicas dos constituintes da fase sólida do solo, tanto a parte mineral quanto orgânica (VEIGA, 2011). Os resultados médios de D_p obtidos mostram que há pouca variação na estrutura mineralógica do solo da Fazenda do Poço como a avaliação por FTIR também sugere.

A média de D_p de 2,6 a 2,7 g/cm^3 é tipicamente encontrada na maior parte dos solos e corresponde a fração de quartzo da parte arenosa do solo (HILLEL, 1998). Assim como na análise da D_s as áreas A1 e A4 não apresentaram diferença significativa de média de D_p no teste T para o nível de 95% de confiança (valor-P = 0,198), sendo que a comparação entre as demais áreas apresentou significância (tabela 4).

Tabela 4 - Teste T Student para D_p .

Áreas Comparadas	Valor - P(T<=t) bi-caudal	Significância (p<0,05)
A1 X A2	0,044	Significante
A1 X A4	0,198	Não Significante
A2 X A4	0,033	Significante

Fonte: Os autores.

3.3 Análise da Porosidade Total (P_T), Macro (M_{ap}) e Microporosidade (M_{ip}) - Método da Mesa de Tensão

Do ponto de vista químico do solo, parâmetros relacionados à porosidade afetam os processos de capacidade de troca catiônica, fixação de fósforo, absorção de água e de nutrientes e a presença de oxigênio, os quais definem o grau de fertilidade do solo bem como seus processos biológicos, portanto, o sucesso do plano de recuperação depende que os indicadores físicos de qualidade do solo estejam dentro dos limites da capacidade suporte de um sistema produtivo (TAVARES *et al.*, 2008). A M_{ip} foi avaliada pela análise das amostras após 24 horas na mesa de tensão (P=0,006 MPa), os resultados obtidos estão dispostos na tabela 5.

Tabela 5 - Estatística Descritiva - Microporosidade (M_{ip}).

Áreas	A1	A2	A3	A4
Parâmetros	Densidade do Solo (g/cm^3)			
MED ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	0,352	0,382	-	0,363
MED (%)	35,2	38,2	-	36,3
DP ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	0,009	0,047	-	0,075
CV (%)	2,65	12,36	-	20,60

MED = média; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Fonte: Os autores.

Nota-se que a microporosidade (M_{ip}) do solo das áreas apresenta pequena variação percentual, sendo que a área A2 apresentou o maior volume de microporos. Este resultado era esperado, por se tratar da área com maior D_s , solos compactados tendem a apresentar maior volume de microporos que macroporos. A aplicação do teste

ANOVA demonstrou que não há variação significativa (valor-P = 0,61) para o nível de confiança de 95% entre as M_{ip} das áreas estudadas, resultado que se manteve com a aplicação do teste de Tukey (Tabela 6).

Tabela 6 - Teste T Student para M_{ip} .

Áreas Comparadas	Valor - P(T<=t) bi-caudal	Significância (p<0,05)
A1 X A2	0,392	Não Significante
A1 X A4	0,825	Não Significante
A2 X A4	0,732	Não Significante

Fonte: Os autores.

O valor da P_T foi obtido por meio dos valores de D_s e D_p , relacionando o valor de P_T com a M_{ip} obtida na mesa de tensão obteve-se o valor de M_{ap} . Os resultados de todos os parâmetros físicos avaliados estão dispostos na tabela 7.

Tabela 7 - P_T x M_{ap} x M_{ip} .

Áreas	P_T ($m^3.m^{-3}$)	P_T (%)	M_{ap} ($m^3.m^{-3}$)	M_{ap} (%)	M_{ip} ($m^3.m^{-3}$)	M_{ip} (%)
1	0,496	49,6	0,144	14,4	0,352	35,2
2	0,450	45,0	0,068	6,8	0,382	38,2
3	-	-	-	-	-	-
4	0,513	51,3	0,150	15,0	0,363	36,3

Fonte: Os autores.

Baixos valores de M_{ap} associam-se à alta compactação o que pode limitar a infiltração de água, o transporte de nutrientes e o crescimento de raízes. A área A2 apresentou a menor M_{ap} dentre todas as áreas de análise, abaixo do valor crítico para solos franco-arenosos ($0,10 m^3.m^{-3}$) presente na literatura (ANDRADE; STONE, 2009). Este valor indica que o solo está muito compactado, processo que afeta mais a M_{ap} do que a M_{ip} . Os valores encontrados em A1 e A4 estão acima do mínimo necessário ($0,10 m^3.m^{-3}$) para o crescimento e desenvolvimento satisfatório de sistemas radiculares.

O indicador de qualidade ambiental deve ser fácil de mensurar de acordo com as condições de campo, aplicável em diversas escalas, extrapolável para regiões similares, relevante para todas as regiões ecológicas e para os processos de degradação observados na área de estudo (LAL, 1999). A macroporosidade e densidade do solo da área A2 se diferenciaram significativamente das áreas A1 e A4, portanto, estes

indicadores são os ideais para o monitoramento do impacto/recuperação na Fazenda do Poço.

3.4 Correlação de Pearson dos Indicadores Físicos

A correlação de Pearson permite verificar a existência e grau de relação entre os desvios de duas ou mais variáveis (LARSON; FABER, 2010). Os indicadores de qualidade do solo podem ser classificados como indicadores resposta, que se referem às características ambientais, condições biológicas e produtividade do solo; os indicadores sensores que por sua vez medem riscos decorrentes do manejo do solo e os indicadores de exposição que permitem a medição da conexão dos indicadores resposta frente aos impactos ambientais (LAL, 1999). Os atributos físicos avaliados por análise de correlação de Pearson (5%) estão dispostos na tabela 8.

Tabela 8 - Correlação de Pearson entre indicadores físicos.

Atributos	P_T	M_{ip}	M_{ap}	D_s	D_p
P_T	1	-0,805*	0,980*	-0,999*	-0,952*
M_{ip}		1	-0,906*	0,773*	0,584*
M_{ap}			1	-0,969*	-0,873*
D_s				1	0,967*
D_p					1

* - significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: Os autores.

Os atributos físicos D_s , D_p , P_T , M_{ap} e M_{ip} , portanto se enquadram como indicadores de exposição e a avaliação destes atributos deve ser feita de forma correlacionada. É notável que há forte correlação inversamente proporcional entre D_s e P_T , pois solos compactados apresentam redução na M_{ap} e aumento na D_s e P_T . A M_{ip} apresenta correlação mais forte com a D_s do que a D_p . Solos com partículas mais densas apresentam menor volume de poros, como indicado na correlação inversamente proporcional entre P_T e D_p (REICHARDT; TIMM, 2008).

3.5 Caracterização das Amostras de Solo Por FTIR

A espectroscopia no infravermelho médio com Transformada de Fourier (FTIR-UATR) é uma técnica moderna que permite o monitoramento da composição mineral e orgânica de amostras de solo, desta forma seu uso na análise pedológica tem aumentado atualmente devido à alta versatilidade e precisão (MARGENOT *et al.*, 2017). Na tabela 9 estão representadas as atribuições aproximadas das principais bandas dos espectros médios das amostras de solo.

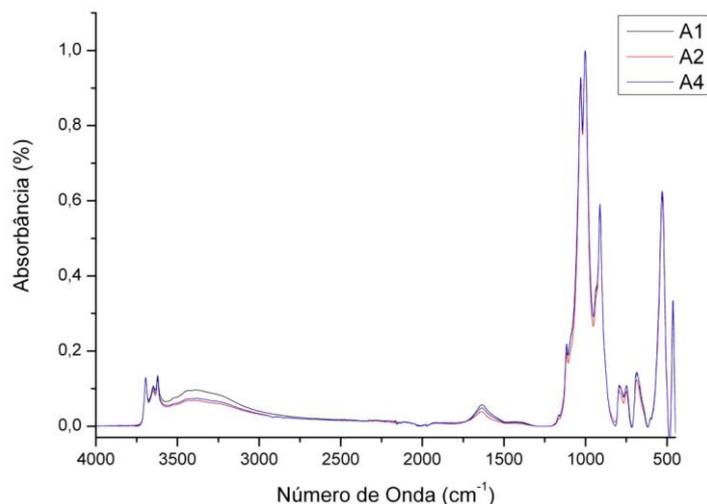
Tabela 9 - Atribuição Aproximada das Principais Bandas do Solo da Fazenda do Poço.

Nº da Banda	Nº de Onda	Atribuição Aproximada	Componentes	Referências
1	3694	Vibração da Ligação Al-OH	Caulinita	Carmona <i>et al.</i> , 2015
2	3647			
3	3621			
4	1634	Estiramento das Ligações C=O e C=C	Amidas, COO ⁻ e Aromáticos - Matéria Orgânica	Calderón <i>et al.</i> , 2013/Du <i>et al.</i> , 2007
5	1163	Estiramento Simétrico da Ligação C-OH	Matéria Orgânica	Dick, Santos e Ferranti., 2003
6	1115	Estiramento da Ligação P-O	Derivados de Ossos e Cartilagens	Boskey & Camacho, 2008
7	1029	Estiramento da Ligação Si-O	Silicatos	Smidt & Meissl, 2007
8	1002			
9	911	Estiramento da Ligação Al-OH	Caulinita	Nayak & Singh. 2007
10	793	Estiramento da Ligação Si-O	Quartzo	Carmona <i>et al.</i> , 2015
11	749	Vibração da Ligação Si-O-Al	Caulinita	
12	684	Vibração da Ligação Fe-O	Óxidos de Ferro - Hematita e Goetita	Beutelspacher & Van Der Marel, 1976
13	531			
14	464			

Fonte: Os autores.

A técnica de FTIR é versátil e permite a observação de características estruturais do solo, desde as propriedades mineralógicas, como a presença de grupos específicos como silicatos, compostos cauliniticos e óxidos de ferro e matéria orgânica como indica as atribuições. A técnica de refletância atenuada (ATR) permite a coleta de dados com a presença de água que proporciona a avaliação *in situ* de amostras sem necessidade de preparação (figura 3) (MARGENOT *et al.*, 2017).

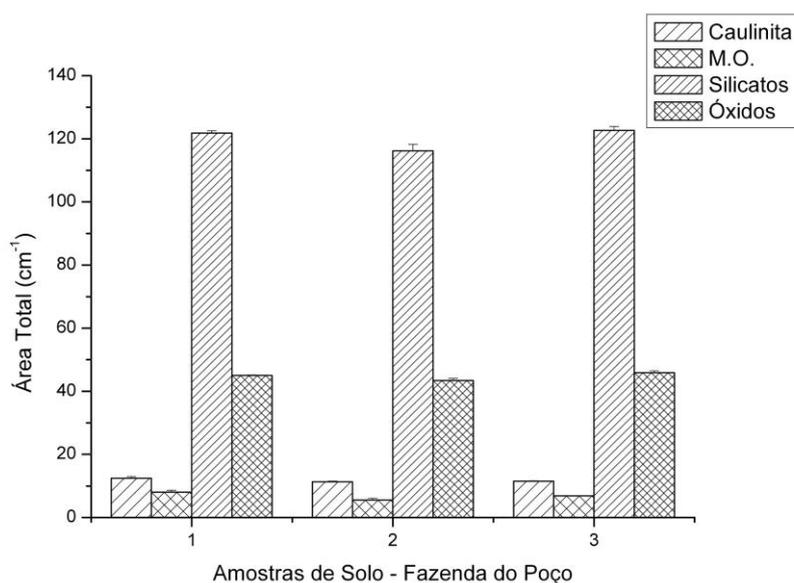
Figura 3 - Espectros Médios - Solo da Fazenda do Poço.



Fonte: Os autores.

Para quantificar, matematicamente, a diferença entre os espectros médios do solo da Fazenda do Poço, foi feito o cálculo da área das principais bandas de absorção por integração no *software Spectrum 5.2*, as bandas escolhidas para o cálculo compreendem a faixa de absorção da Caulinita ($3750\text{ cm}^{-1} - 3575\text{ cm}^{-1}$), Matéria Orgânica ($1760\text{ cm}^{-1} - 1480\text{ cm}^{-1}$), Silicatos ($1200\text{ cm}^{-1} - 820\text{ cm}^{-1}$) e Óxidos de Ferro ($820\text{ cm}^{-1} - 450\text{ cm}^{-1}$). Com a realização do cálculo é possível notar a homogeneidade das amostras, resultado esperado considerando que os solos da área possuem a mesma classificação pedológica (DICK; SANTOS; FERRANTI, 2003). As áreas foram plotadas em histograma com uso do *software Origin Pro 7.5* (figura 4).

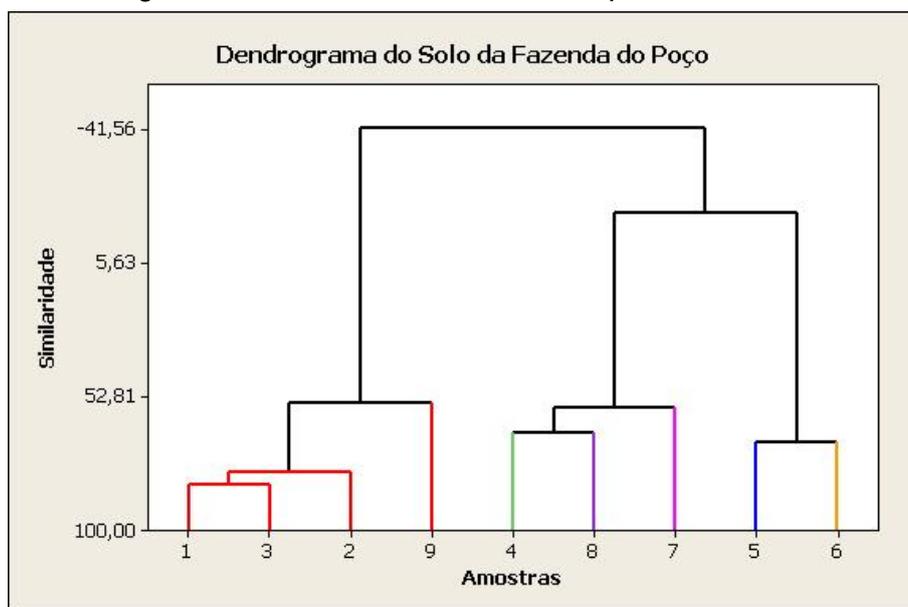
Figura 4 - Histograma das Áreas das Bandas Principais.



Fonte: Os autores.

A composição mineralógica do solo é bem homogênea nas áreas avaliadas conforme indica as áreas das bandas de caulinita, silicatos, MO e óxidos de ferro, apenas a banda de matéria orgânica apresentou maior variação, a área A2 apresentou o menor valor de área da banda de matéria orgânica, resultado esperado considerando que a compactação do solo na área é maior de acordo com os dados de densidade do solo coletados na área, este processo dificulta a absorção de matéria orgânica e a atividade microbiana do solo é comprometida (BITTAR *et al.*, 2013). Os espectros também foram submetidos à análise multivariada e as áreas avaliadas foram as mesmas que foram avaliadas as áreas (figura 5).

Figura 5 - Análise Multivariada dos Espectros Médios.



Fonte: Os autores.

Apenas as amostras da área A1 (1, 2 e 3) apresentam maior homogeneidade formando um agrupamento independente, assim como a semelhança das amostras com o fragmento florestal (9) que é de 55,06%. As amostras de A2 são mais heterogêneas se assemelhando ao fragmento com significância de 56,93%. As amostras de A1 e A2 estão em agrupamentos independentes uma da outra, ou seja, há maiores semelhanças entre a área A1 e o fragmento (A4) do que em relação à A2. Sugere-se, portanto, que o processo de recuperação de A1 está mais avançado do que em A2 como também é demonstrado pelos indicadores físicos avaliados.

4 CONCLUSÃO

A análise de variância (ANOVA) e teste T de Student ($p < 0,05$) demonstrou significância de variação de médias dos indicadores físicos entre as áreas A1 x A2 e A2 x A4, resultado que demonstra não haver uniformidade entre estas áreas. As análises estabelecidas entre as áreas A1 x A4 não apresentaram diferença de média significativa, resultado que indica a maior similaridade entre as condições do solo entre A1 e A4, este

resultado também foi obtido pela análise de espectroscopia FTIR, a análise multivariada confirma a maior similaridade entre as amostras de A1 e A4. A análise de correlação de Pearson demonstrou alta correlação entre os indicadores físicos, salientando-se a alta correlação entre P_T e D_s , indicadores, importantes para definir o grau de compactação do solo.

Os poros do solo permitem a retenção (M_{ip}) e transporte (M_{ap}) de nutrientes, que facilitam a atuação da biota do solo com conseqüente melhoria dos indicadores biológicos e químicos do solo. As correlações obtidas sugerem a alta influência da condição física do solo com as demais funções do solo. A compactação do solo culmina na diminuição de M_{ap} e aumento da D_s . Considerando-se 15 anos de intervenção para recuperação na Fazenda do Poço o presente estudo sugere que para reduzir o impacto na M_{ap} é necessário aumentar o volume de MO no solo para fomentar a atividade da biota do solo (macrofauna) e realizar o plantio de espécies arbóreas com raízes agressivas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. O. P. O.; SÁNCHEZ L. E. Indicadores da qualidade do substrato para monitoramento de áreas de mineração revegetadas. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 153-163, 2015.

ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.**, v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009.

BEUTELSPACHER, H.; VAN DER MAREL. H. W. **Atlas of infrared spectroscopy of clay minerals and their admixtures**. Amsterdam: Elsevier, 1976. 379 p.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 843-849, 2005.

BITTAR, I. M. B. *et al.* Influência da Textura do Solo na Atividade Microbiana, Decomposição e Mineralização do Carbono de Serapilheira de Sítios do Bioma Cerrado sob Condições de Incubação. **Biosci. J.**, v. 29, n. 6, p. 1952-1960, 2013.

BOSKEY, A.; CAMACHO, N. P. FT-IR imaging of native and tissue-engineered bone and cartilage. **Biomaterials**, v. 28, n. 15, p. 2465-2478, 2007.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2016. 135 p.

CALDERÓN, F. *et al.* Diffuse-reflectance Fourier-transform mid-infrared spectroscopy as a method of characterizing changes in soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 5, p. 1591-1600, 2013.

CARMONA, I. N. *et al.* Caracterização Química e Mineral de Feições de Solos tipo TPA da Região do Salobo (Província Mineral de Carajás, Pará). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. **Anais...Natal: UFOPA**, 2015.

Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/711.pdf>. Acesso em: 01 out. 2019.

DICK, D. P.; SANTOS, J. H. Z.; FERRANTI, E. M. Chemical characterization and infrared spectroscopy of soil organic matter from two southern Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.**, v. 27, n. 1, p. 29-39, jan./fev. 2003.

DONAGEMA, G. K. *et al.* **Manual de métodos de análise de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2011. 230 p.

DU, C. *et al.* Characterization of soils using photoacoustic mid-infrared spectroscopy. **Applied spectroscopy.**, v. 61, n. 10, p. 1063-1067, 2007.

HILLEL, D. **Environmental soil physics.** San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

LAL, R. **Métodos para avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 97 p.

LARSON, R.; FABER, B. **Estatística aplicada.** São Paulo: Prentice Hall, 2010. 672 p.

MARGENOT, Andrew J. *et al.* IR Spectroscopy, soil analysis applications. In: **Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry.** Elsevier Inc., p. 448-454, 2017.

NAYAK, P. S.; SINGH, B. K. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. **Bulletin of Materials Science**, v. 30, n. 3, p. 235-238, 2007.

PEREIRA, D. C. *et al.* Aplicação da Espectroscopia no Infravermelho na Análise Granulométrica (75 µm e 125 µm) de *Salvinia auriculata*. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 21., 2017, São José dos Campos. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: UNIVAP, 2017.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental.** São Paulo: Nobel, 1990.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri: Manole, 2008. 524 p.

SANTOS, R. D. *et al.* **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92 p.

SILVA, A. O. da.; HERDJANIA, V. de L. Mesa de tensão com areia: Procedimentos para montagem e validação. **R. Bras. Ci. Solo.** n. 32, p. 2209-2114, 2008.

SILVA, M. A. A. **Avaliação da qualidade ambiental de áreas degradadas em recuperação: Fazenda do Poço (Jacareí/SP): um estudo de caso.** 2016. 71f. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.

SMIDT, E.; MEISSL, K. The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management. **Waste management.**, v. 27, n. 2, p. 268-276, 2007.

TAVARES, S. R. de L. *et al.* **Curso de recuperação de áreas degradadas.** Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2008. 238 p.

VEIGA, M. **Metodologia para coleta de amostras e análises físicas do solo.**
Florianópolis: Epagri, 2011. 52 p.