



Avaliação de alterações na compactação de solos por usos e manejo agrícolas por meio de ensaio dinâmico de penetração

Evaluation of the changes in the soil compaction due to agricultural uses and management by dynamic penetrometer test

Soares, Diego Ruiz ¹✉ - Rotta, Cláudia Marisse dos Santos¹ - Zuquette, Lázaro Valentin ¹

Recibido: 08 de mayo de 2015 • Aceptado: 01 de octubre de 2015

Abstract

This work shows a study about the soil compaction by the agricultural use in the Basin of Ribeirão do Pinheirinho, São Paulo State, Brazil. It was developed soil resistance to penetration tests with a dynamic penetrometer on different locations in the study area. The results of the soil resistance to penetration, in the most part, were high, especially on the layer of 20 to 40 centimeters deep. Due to the traffic of vehicles and machinery the secondary and farm roads present values of soil resistance to penetration higher than those measured in the croplands. As a consequence, it causes the development of erosion processes because of high taxes of runoff. Both the intensive agricultural use and the characteristics of the geological materials can be pointed as the main factors of soil compaction, erosion and changes in the surface and subsurface water dynamic.

Keywords: *Compaction, soil resistance to penetration, dynamic penetrometer, environmental degradation, Brazil.*

Resumo

O presente trabalho apresenta o estudo sobre compactação do solo sob uso agrícola na Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, Estado de São Paulo, Brasil. Realizaram-se ensaios de resistência do solo a penetração com um penetrômetro dinâmico em diversos pontos da área de estudo, verificando-se, na maioria dos casos, elevados valores de resistência à penetração, sobretudo nos 20-40 cm superficiais. Em decorrência do tráfego de veículos e máquinas, as estradas secundárias e carreadores apresentaram valores de resistência mais elevados que os encontrados nas áreas de cultivo, condicionando o desenvolvimento de processos erosivos em decorrência da geração de alto escoamento superficial. Tanto o uso agrícola intensivo na bacia quanto as características dos materiais geológicos podem ser apontadas como os fatores principais para o processo de compactação do solo verificado na bacia, bem como outros cenários decorrentes da degradação ambiental, como feições erosivas e alteração da dinâmica de águas superficiais e subsuperficiais.

1. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; São Carlos, Brasil

✉ diego.soares@usp.br

Palavras-chave: *Compactação, resistência à penetração do solo, penetrômetro dinâmico, degradação ambiental, Brasil.*

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das diversas atividades antropogênicas envolvendo componentes do meio físico geram alterações nas condições intrínsecas dos materiais geológicos afetando o seu comportamento frente ao desenvolvimento dos processos geológico e outros componentes ambientais.

Dentre as principais alterações físicas está o processo de compactação do solo, atribuído à redução do volume de macroporos e, consequentemente, rearranjo das partículas na matriz do solo, por um lado reduzindo o tamanho e continuidade dos poros e, por outro, aumentando o peso específico seco e a resistência mecânica. A esse conjunto de alterações associam-se processos negativos, como redução da aeração do solo e da taxa de infiltração e condutividade hidráulica saturada (Reichert *et al.*, 2007). Consequentemente, além de comprometer o desenvolvimento das plantas pela diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento radicular e aeração deficiente, também verifica-se o aumento do escoamento superficial que pode levar à aceleração de processos geológicos, como a erosão e o assoreamento, gerando um cenário de degradação.

Segundo Bennie e Krynauw (1985), o processo de compactação depende tanto de fatores internos quanto externos. Dentre os internos estão aqueles intrínsecos ao material geológico, como composição mineralógica, textura, estrutura, teor de umidade e matéria orgânica. Os fatores externos, por outro lado, são atribuídos principalmente à energia aplicada ao solo, ocorrendo de modo natural, pela ação do impacto das gotas de chuva, ou por atividades antropogênicas.

O tráfego de maquinários e implementos agrícolas e o intenso pisoteio de animais geralmente são apontados como principais causas da compactação de solos, uma vez que exercem uma força mecânica externa considerável sobre a superfície e, consequentemente, atingindo até 60 cm de profundidade (Duijker, 2004; Reichert *et al.*, 2007; Davies & Lacey, 2011). O avanço da mecanização embora tenha contribuído para facilitar e agilizar o trabalho de manejo, também compromete a qualidade do solo, uma vez que o uso de máquinas e implementos maiores e mais pesados resulta na compactação do solo, com destaque para as estradas secundárias e carregadores.

Um dos indicadores de compactação no solo é sua resistência à penetração, isto é, a resistência mecânica que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, tal como o crescimento de raízes, sendo, contudo, um indicador secundário de compactação, não sendo uma medição física direta de qualquer condição do solo (Mantovani, 1987). Os penetrômetros fornecem boas estimativas da resistência mecânica do solo à penetração, uma vez que apresentam como principais vantagens a facilidade e rapidez na obtenção dos resultados (Bengough e Mullins, 1990).

O penetrômetro de impacto ou dinâmico tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste com ponteira metálica no solo através do impacto de um êmbolo (martelo) de massa conhecida a uma altura fixa, fornecendo uma energia constante a cada golpe. Assim, associando-se a quantidade de golpes e a profundidade de penetração da ponteira, verifica-se a resistência à penetração do solo em diferentes profundidades, possibilitando uma rápida avaliação do grau de compactação (Herrick & Jones, 2002).

Uma vez que a compactação apresenta efeitos não só pontuais mas também em macroescala, desencadeando tanto prejuízos ambientais, como a perda de qualidade do solo e dos

recursos hídricos, bem como econômicos, associados a perda de produtividade agrícola e maiores quantidades de energia e insumos para manter a mesma produtividade em solos degradados, o estudo dos processos que envolvem a compactação permite uma avaliação das intensidades destas alterações que levam a degradação ambiental.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo a avaliação da compactação do solo na Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, sobretudo no sentido de identificar casos de degradação ambiental devido ao uso agrícola da área de estudo.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, com área de 4000 hectares, compreende parte dos municípios de Brotas e Itirapina, centro do Estado de São Paulo (Figura 1).

De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é do tipo Cwa - subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C), apresentando precipitações médias que variam entre 1200 a 2000 mm.

Geologicamente a região é constituída por materiais relacionados a 3 formações geológicas, a saber: Formação Itaqueri (arenitos variados com diferentes graus de cimentação), Formação Serra Geral (basaltos) e Formação Botucatu (arenitos bem cimentados).

A vegetação da região varia entre Cerrados, Cerradões e Matas de Galeria que acompanham cursos d'água. Contudo, destaca-se o amplo uso do solo para agropecuária, sendo a maior parte da bacia ocupada pela cultura de cana-de-açúcar, reflorestamento e pastagens.

METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho envolveu uma série de etapas, tanto de levantamento de dados quanto trabalhos de campo e laboratório, que posteriormente serviram de base para uma avaliação final. As etapas básicas do desenvolvimento deste trabalho estão sumarizadas no fluxograma da Figura 2.

Levantamentos de dados e materiais prévios

Inicialmente, desenvolveram-se trabalhos de escritório, onde foram reunidas as cartas topográficas e mapa de materiais geológicos da região, em escala de 1:10000, além de imagens de satélite e fotografias aéreas de diferentes períodos e escalas.

A partir do georreferenciamento e digitalização dos mapas topográficos, delimitou-se a área de estudo e, em associação às imagens de satélite, fotografias aéreas e estudos prévios sobre a área, buscou-se avaliar a dinâmica de uso e ocupação da bacia estudada, aspectos associados aos materiais geológicos e aos corpos hídricos. A identificação e análise prévia desses elementos orientaram, por sua vez, o planejamento da etapa de campo.

Mapa de materiais geológicos

Na etapa de campo, houve um mapeamento dos materiais geológicos na escala do trabalho, utilizando-se como base a topografia, observação dos contatos entre diferentes unidades geológicas, análise visual de materiais de diferentes texturas e utilização de mapa de materiais consolidados em outra escala. A partir das observações de campo, elaborou-se o mapa de materiais consolidados com sua distribuição anterior ao processo de uso intensivo da bacia.

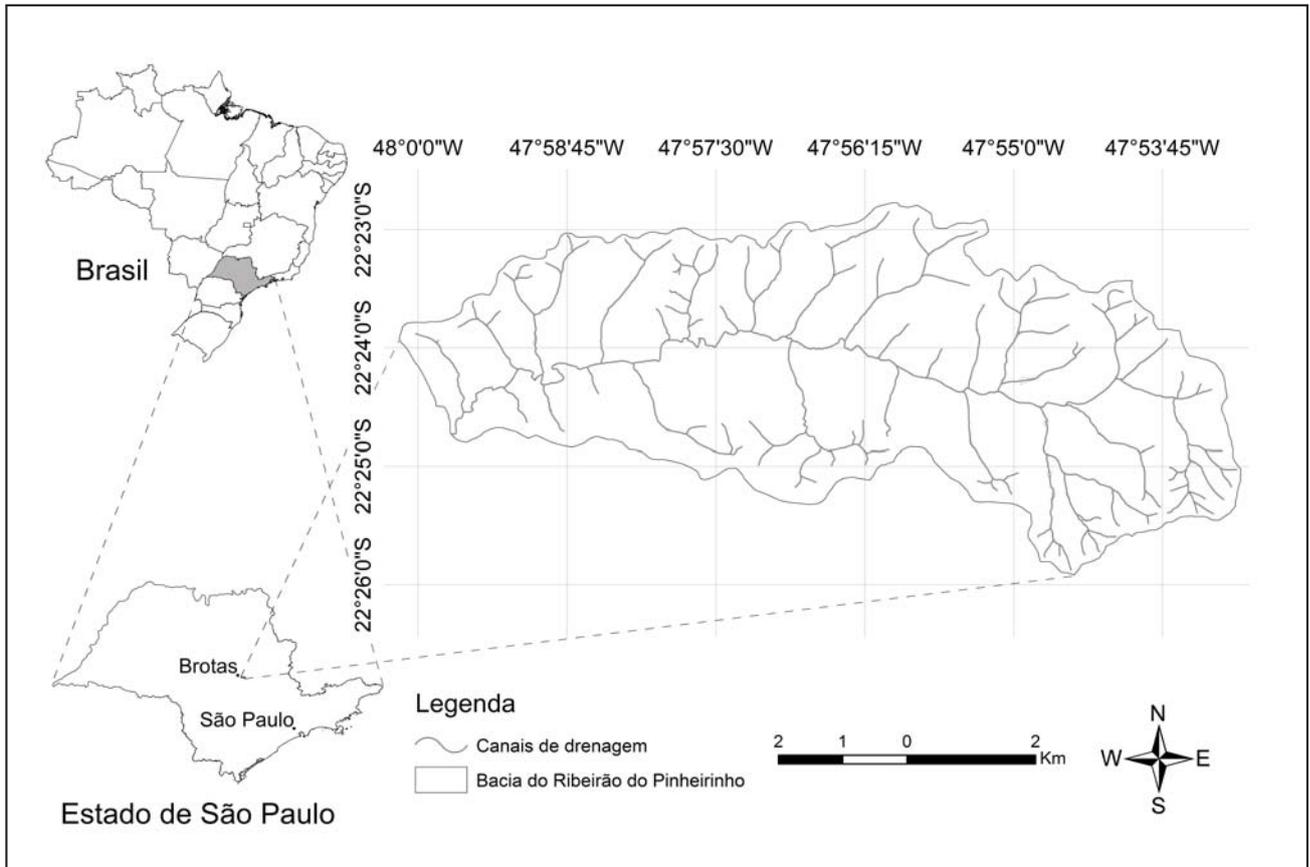


Figura 1. Localização da Bacia do Ribeirão do Pinheiro.

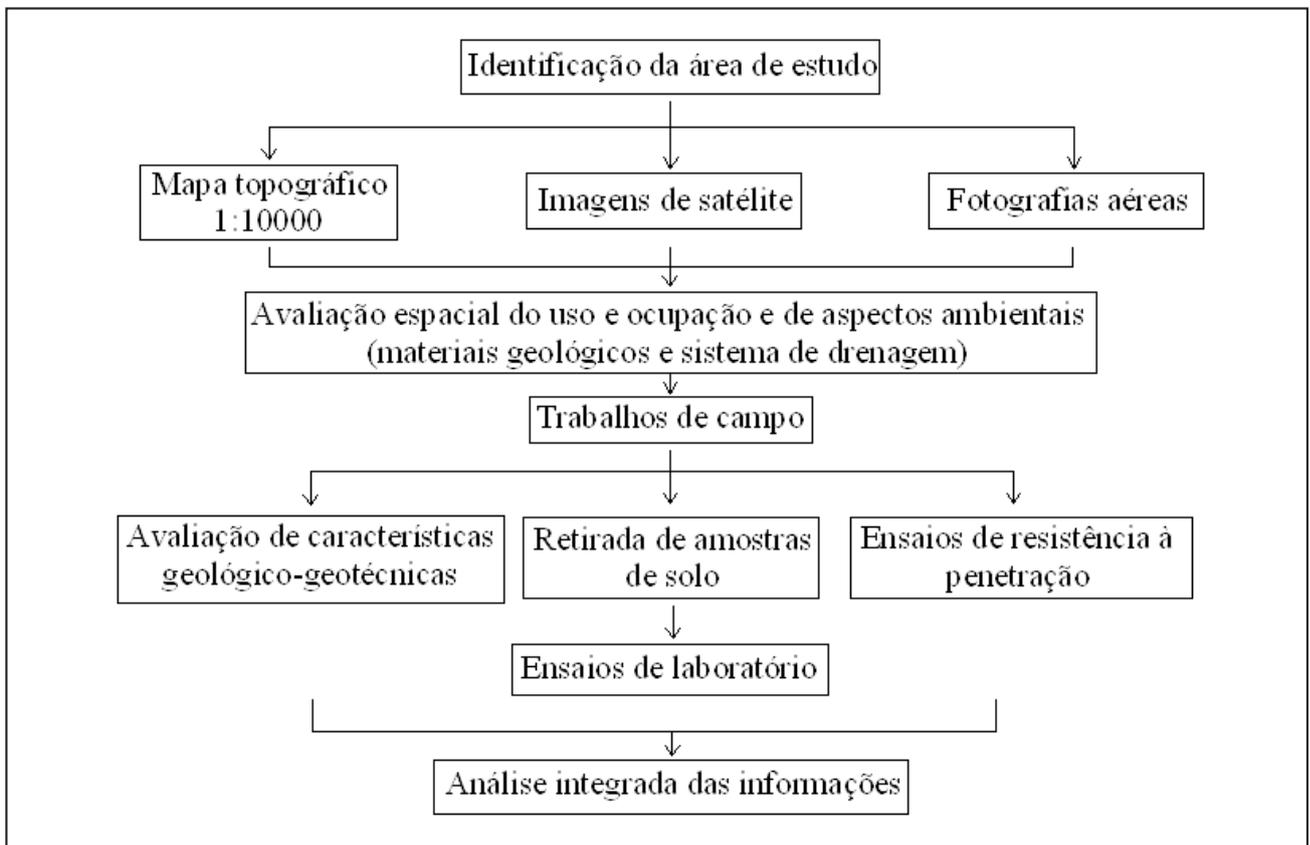


Figura 2. Fluxograma indicativo das principais etapas do trabalho.

Trabalhos de campo

Realizou-se uma avaliação em campo das condições do sistema de drenagem relacionadas a aspectos como extensão, nível de água, presença de vegetação marginal, e condições gerais dos canais. Além disso, foram avaliados aspectos como a presença de processos erosivos, condições de cobertura do solo, e outros indicadores de degradação ambiental.

Os trabalhos de campo envolveram ainda a amostragem de solo e realização de ensaios de resistência do solo à penetração. Tanto a amostragem dos materiais inconsolidados quanto os ensaios de penetração basearam-se nas informações prévias sobre os tipos de materiais presentes na área, assim como no uso e ocupação.

Foram retiradas amostras deformadas e indeformadas, sendo que em alguns pontos foram feitas trincheiras que permitiram a retirada de amostras de diferentes horizontes.

Para determinação da resistência à penetração utilizou-se um penetrômetro dinâmico (Figura 3), sendo o ensaio realizado a partir da superfície do solo até uma profundidade de cerca de 1,80 m. O penetrômetro utilizado é composto por duas hastes metálicas, uma inferior, na qual é rosqueada a ponteira metálica, e a superior onde desliza-se verticalmente o êmbolo (martelo) a partir de uma altura conhecida, impactando a junção responsável pela união das hastes descritas.

Este ensaio foi realizado em diferentes pontos da bacia, de modo a avaliar a resistência do solo sobre os vários usos e em diferentes materiais geológicos, sendo ainda determinada a umidade do solo em intervalos de profundidade de 20 cm.



Figura 3. Visão geral do ensaio com penetrômetro dinâmico.

A partir do número de golpes e da profundidade de penetração da haste em cada golpe, determinou-se a resistência do solo à penetração e construiu-se, para cada ponto, uma curva relacionando a resistência com a profundidade. A resistência do solo foi obtida por meio da equação 1, apresentada por Cassan (1982), utilizada por Vanags et al (2004) e Furegatti (2012):

$$R = \frac{mgH}{A \cdot \Delta Z} \frac{m}{m+m'} \quad (1)$$

Donde:

R: resistência à penetração (Pa);

A: área da base do cone (m²);

g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

H: altura de queda do martelo (m);

m: massa do martelo (kg),

m': massa total do penetrômetro (kg).

Δz: profundidade da penetração da haste para um golpe (m).

Trabalhos de laboratório

Os materiais inconsolidados foram ensaiados em termos de granulometria, peso específico dos sólidos e peso específico seco. Em paralelo, determinou-se o teor de umidade do solo de diferentes profundidades dos locais onde os ensaios de resistência a penetração foram realizados.

Análises gerais

Por fim, avaliou-se os dados obtidos tanto nos trabalhos de campo quanto pelos ensaios de laboratório, buscando-se caracterizar a dinâmica dos processos geológicos identificados na área de estudo, sobretudo no sentido de identificar casos de degradação ambiental devido à interferência antrópica, com destaque para os efeitos da compactação do solo na dinâmica de águas superficiais e subsuperficiais da bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapa de materiais geológicos

Observa-se o predomínio de materiais inconsolidados re-trabalhados arenosos da Formação Itaqueri (Unidades 1, 1a, 2, 3, 4, e 5), apresentando diferenças entre si, como espessura dos materiais variando entre 1 a 4 m de profundidade; presença de linhas de concreções de até 30 cm entre camadas de materiais ou presença de concreções dispersas; e profundidades do saprolito e da rocha matriz variando entre 1 a 4 m de profundidade. Esses materiais ocorrem sobrepostos aos residuais da Formação Itaqueri, que podem ocorrer sobre a forma de material inconsolidado, saprolito, ou rocha alterada.

Por sua vez, a presença de materiais residuais argilosos (Unidades 6, 7, e 10) está associado a Formação Serra Geral, com exposição natural da rocha basáltica alterada e consolidada a partir de determinado trecho do canal de drenagem principal.

O exutório da Bacia apresenta materiais inconsolidados residuais arenosos da Formação Botucatu (Unidade 9), presentes juntamente ao saprolito e rocha fragmentada em camadas não superiores a 1 m de profundidade.

Ensaio de Laboratório

Para a avaliação geral dos materiais geológicos, ensaiaram-se os mesmos em termos de granulometria, peso específico dos sólidos e peso específico seco, sendo os resultados sumarizados na Tabela 1.

Em virtude das profundidades nas quais retiraram-se as amostras, denominou-se profundidade A, referente a faixa entre 30-40 cm; B, referente a faixa entre 80-100 cm; C, referente à profundidades superiores a 100 cm, associadas à amostras retiradas de taludes de estradas, em profundidades nas quais não há modificação da estrutura natural dos materiais em função do tipo de uso do solo.

Tabela 1. Caracterização física das amostras de solo da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

Unidade de materiais inconsolidados	Pontos de amostragem	Uso do solo	Profundidade	Granulometria			γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	(e)	(n) (%)
				Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)				
1	4	Cultivo de cana-de-açúcar	A	70,0	14,0	16,0	26,73	17,22	0,55	35,58
	P44	Condição natural subsuperficial	B	72,0	14,5	13,5	26,46	16,74	0,58	36,72
2	9	Cultivo de cana-de-açúcar	A	68,5	20,5	11,0	27,09	16,81	0,61	37,94
	P60	Condição natural subsuperficial	B	78,0	5,0	17,0	25,96	16,87	0,54	35,00
	DC 15	Cultivo de cana-de-açúcar	A	54,0	8,0	38,0	26,95	15,67	0,72	41,87
	21	Carreador	B	55,0	8,0	37,0	26,86	12,89	1,08	52,01
3	10	Carreador	C	67,5	13,0	19,5	27,33	16,41	0,67	39,96
	13	Cultivo de cana-de-açúcar	A	47,0	14,0	39,0	27,70	15,07	0,84	45,60
4	11	Carreador	B	44,0	17,0	39,0	29,29	13,81	1,12	52,86
	DC 18	Cultivo de cana-de-açúcar	A	63,5	10,5	26,0	26,86	15,72	0,71	41,47
	DC 13	Cultivo de cana-de-açúcar	B	61,2	10,8	28,0	26,3	--*	--*	--*
	DC 16	Eucalipto	A	78,5	8,0	13,5	26,1	19,3	0,4	26,3
7	11	Carreador	B	73,0	8,0	19,0	26,6	16,9	0,6	36,5
	P37	Condição natural subsuperficial	A	65,5	6,5	28,0	26,41	16,20	0,63	38,66
	P38	Condição natural subsuperficial	B	66,0	5,2	28,8	26,63	13,64	0,95	48,77
	P39	Condição natural subsuperficial	A	71,0	5,5	23,5	26,67	16,77	0,59	37,10
8	P45	Condição natural subsuperficial	B	69,0	11,0	20,0	27,74	16,02	0,73	42,27
	Pen 18	Pastagem	A	75,0	8,0	17,0	26,28	17,61	0,49	32,98
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	B	72	10	19	27,78	16,62	0,67	40,18
		Pastagem	A	64	11,5	24,5	26,27	16,14	0,63	38,55
8	P37	Condição natural subsuperficial	B	65	11,5	23,5	26,21	15,19	0,73	42,04
	P38	Condição natural subsuperficial	A	70	9,5	20,5	26,40	16,28	0,62	38,32
	P39	Condição natural subsuperficial	B	71,5	6,5	22,0	26,91	25,63	0,72	41,92
	P45	Condição natural subsuperficial	C	75,5	13,5	12	26,61	18,01	0,48	32,30
8	Pen 18	Pastagem	C	74,0	8,2	17,8	27,10	15,14	0,79	44,14
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	C	83	5,9	11,1	26,30	14,89	0,77	43,38
8	Pen 18	Pastagem	C	76	11	13	26,19	15,13	0,73	42,24
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	A	63,0	16,5	20,5	27,15	15,90	0,71	41,43
8	Pen 18	Pastagem	B	63,9	15,0	21,1	27,43	15,20	0,80	44,58
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	A	70,0	12,5	17,5	26,31	15,36	0,71	41,61
8	Pen 18	Pastagem	B	65,5	12,7	21,8	26,51	14,55	0,84	45,74
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	B	65,5	12,7	21,8	26,51	14,55	0,84	45,74

* Devido ao grau de compactação, não retirou-se amostra indeformada dessa profundidade, impossibilitando o ensaio de peso específico seco.

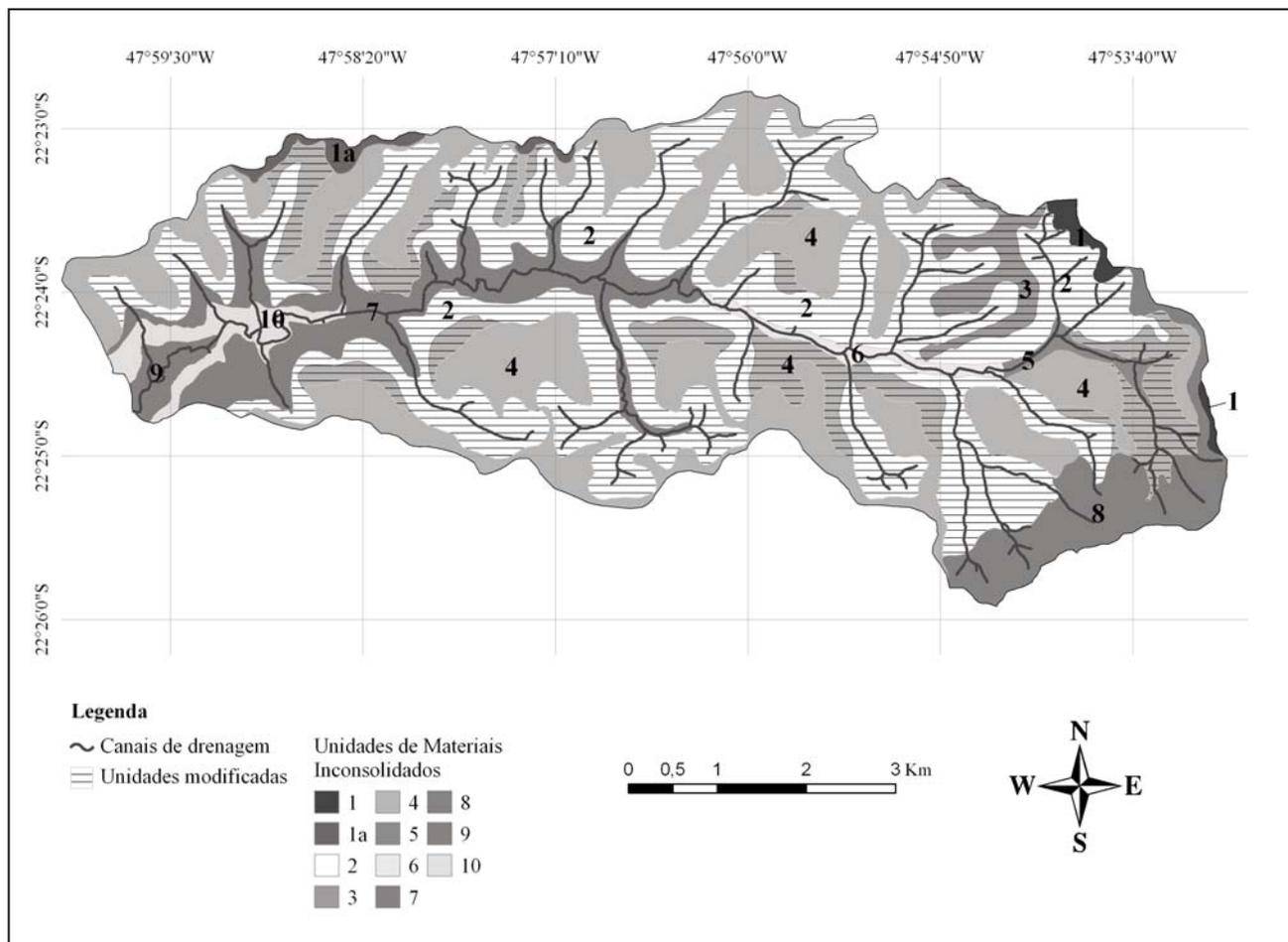


Figura 4. Mapa de materiais inconsolidados da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

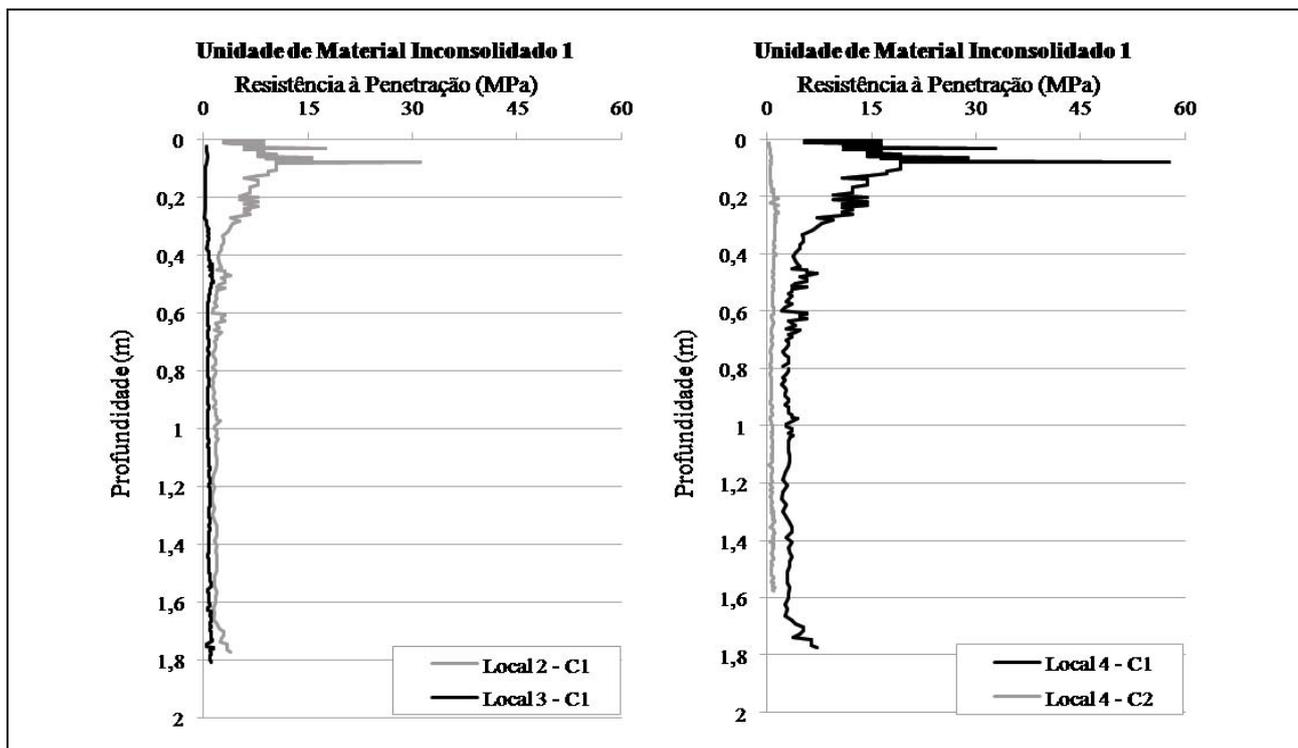


Figura 5. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo na unidade 1.

De maneira geral, verifica-se o predomínio de materiais arenosos, com teores de areia entre 45% e 80%, de silte entre 5% e 20% e de argila entre 11% e 39%. Ressalta-se que esta predominância apresenta-se na maioria das amostras, sobretudo nos materiais retrabalhados da Formação Itaqueri.

Em relação ao peso específico seco, nos locais amostrados em duas profundidades, observa-se uma redução de 0,5 a 2,8 kN/m³, com exceção das amostras do ponto DC16, com

aumento de 9,35 kN/m³. Neste caso, o uso do solo por reflorestamento de eucalipto pode estar associado ao valor elevado na camada mais profunda.

Consequentemente à variação entre os pesos específicos nas duas profundidades, ocorre um aumento da porosidade da camada subsuperficial, chegando a 10% em alguns pontos cujo uso do solo é o cultivo da cana-de-açúcar.

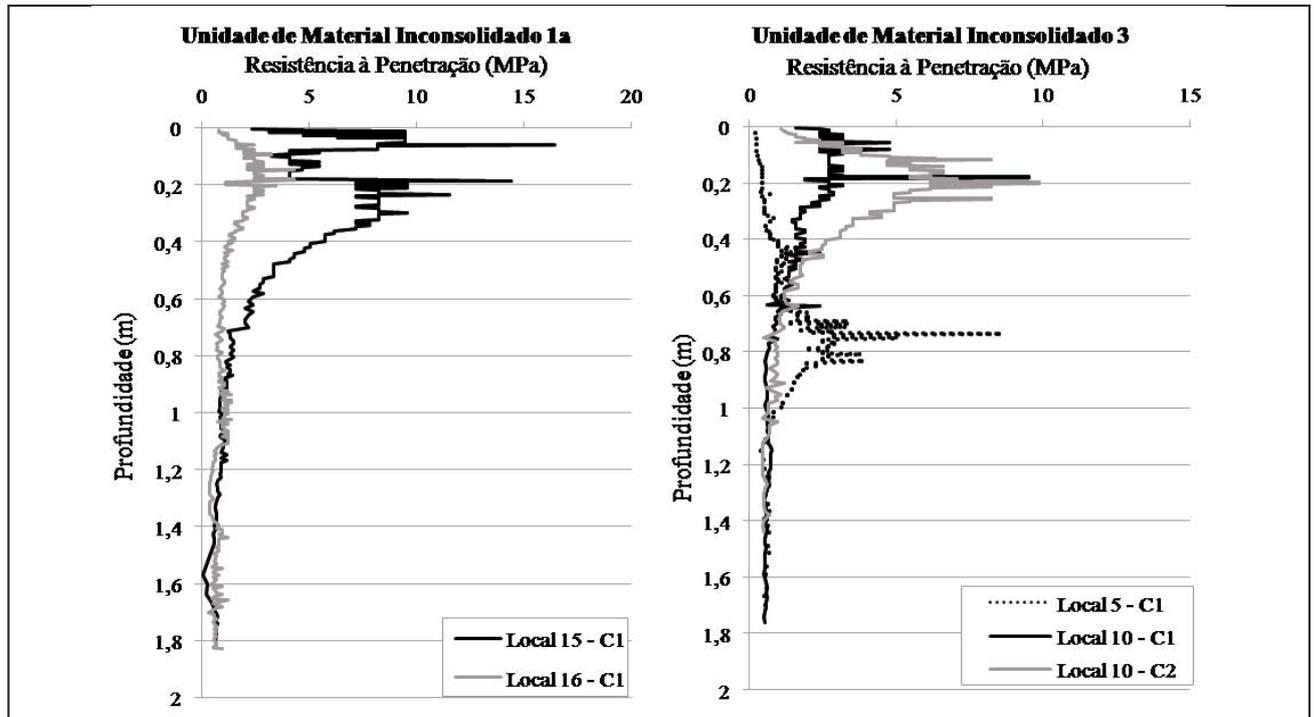


Figura 6. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 1a e 3.

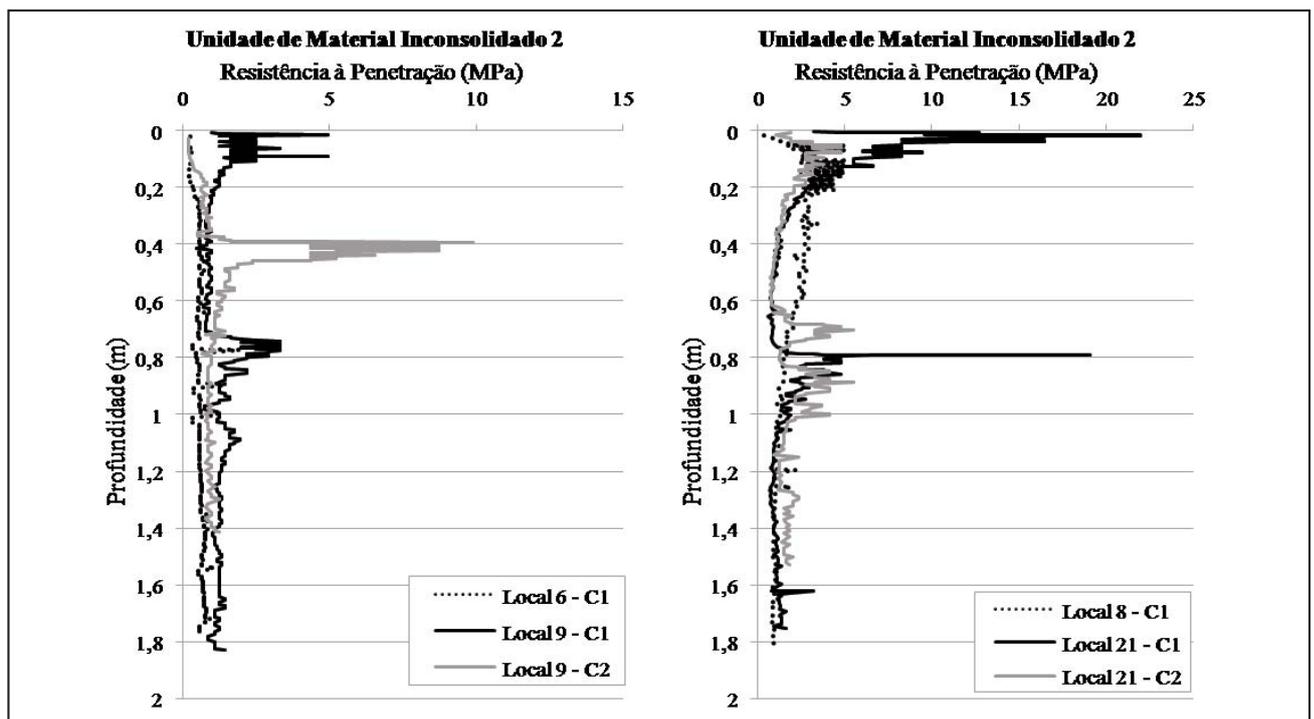


Figura 7. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo na unidade 2.

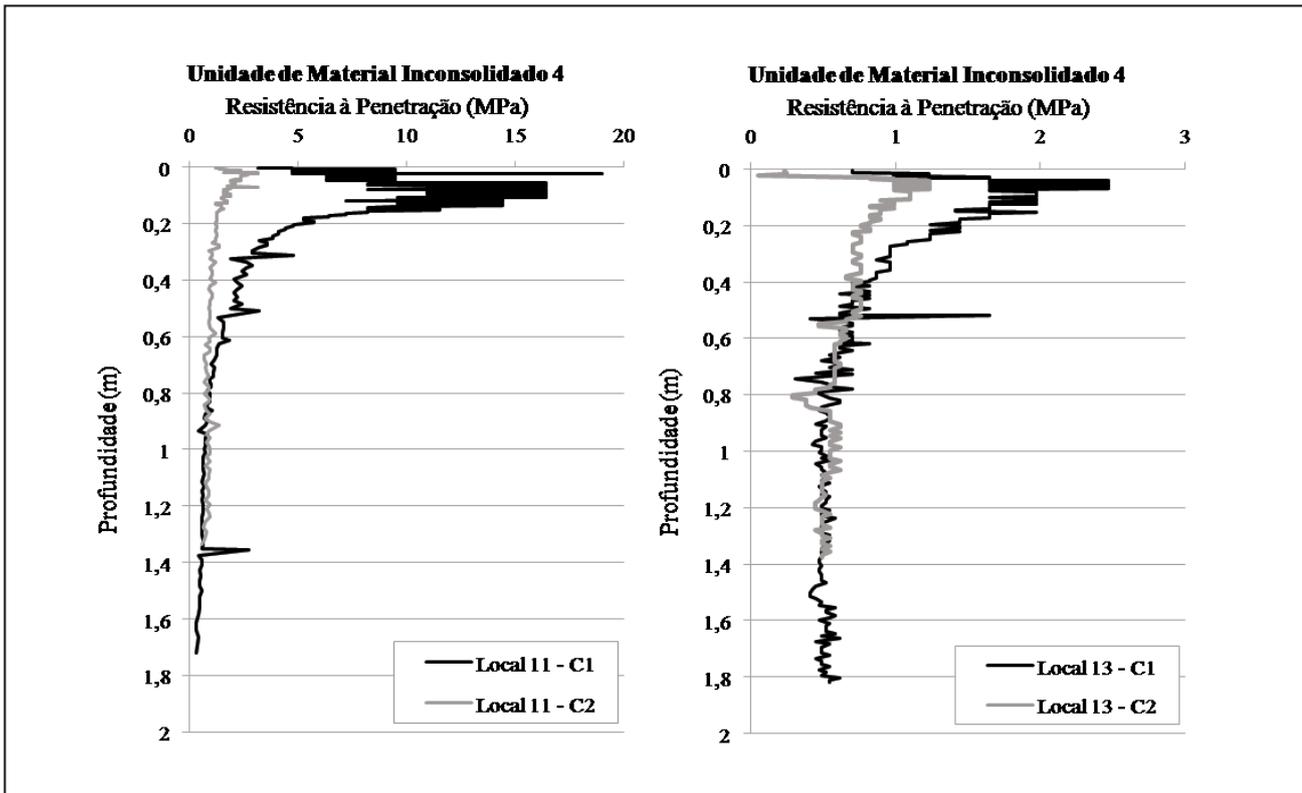


Figura 8. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo na unidade 4.

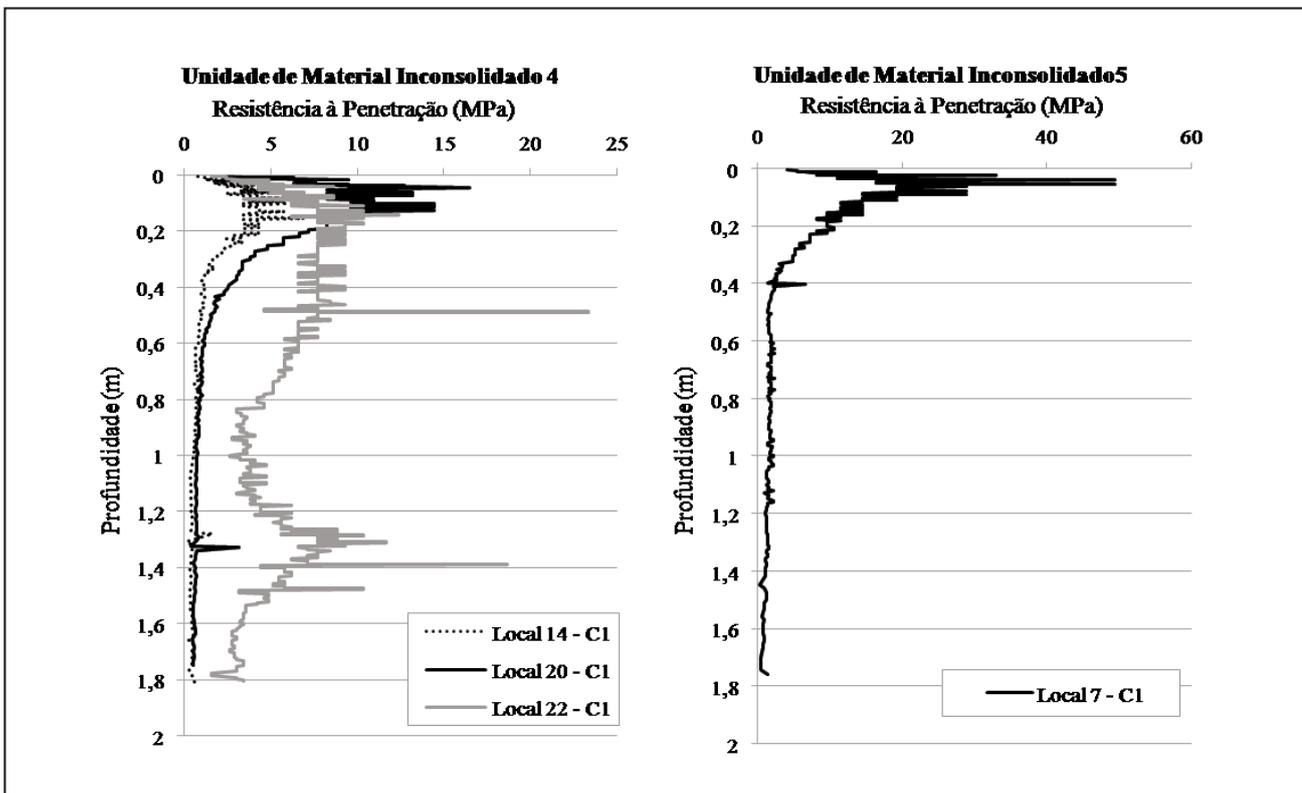


Figura 9. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 4 e 5.

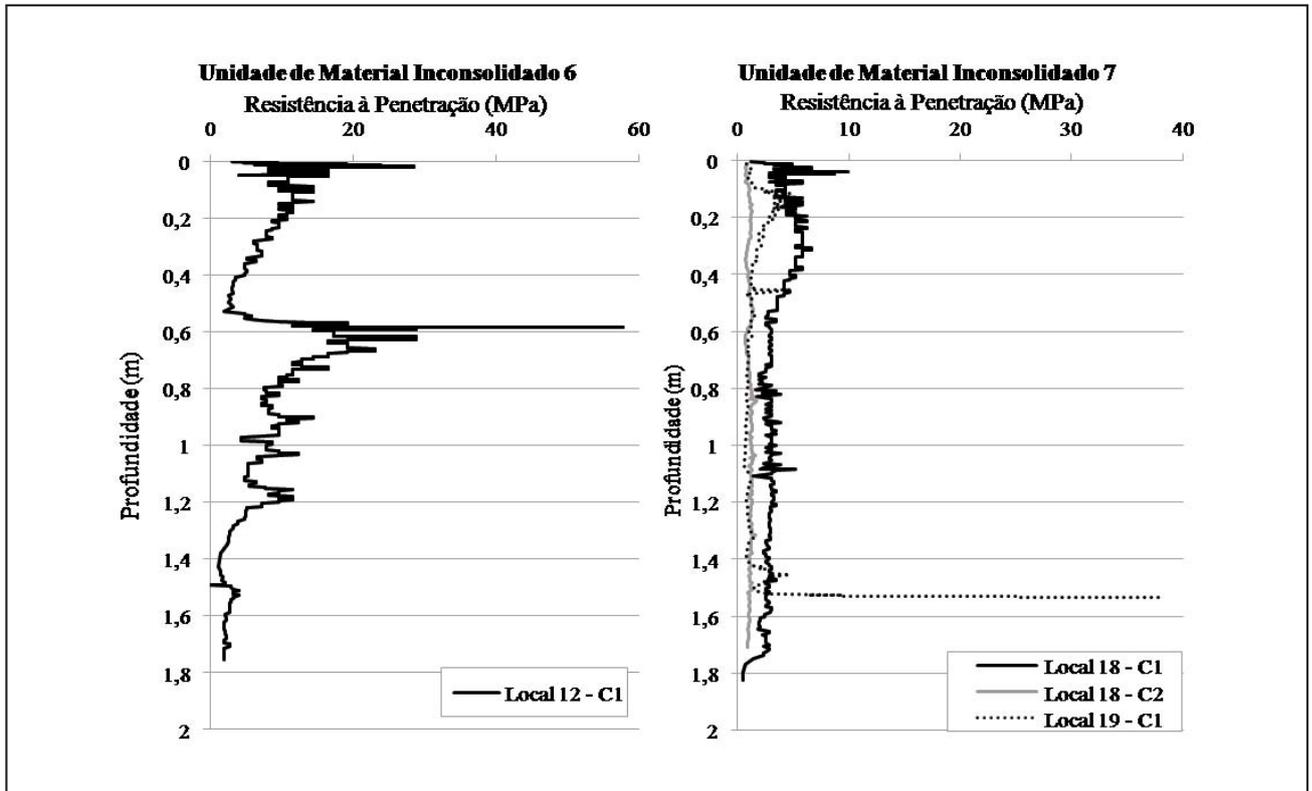


Figura 10. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 6 e 7.

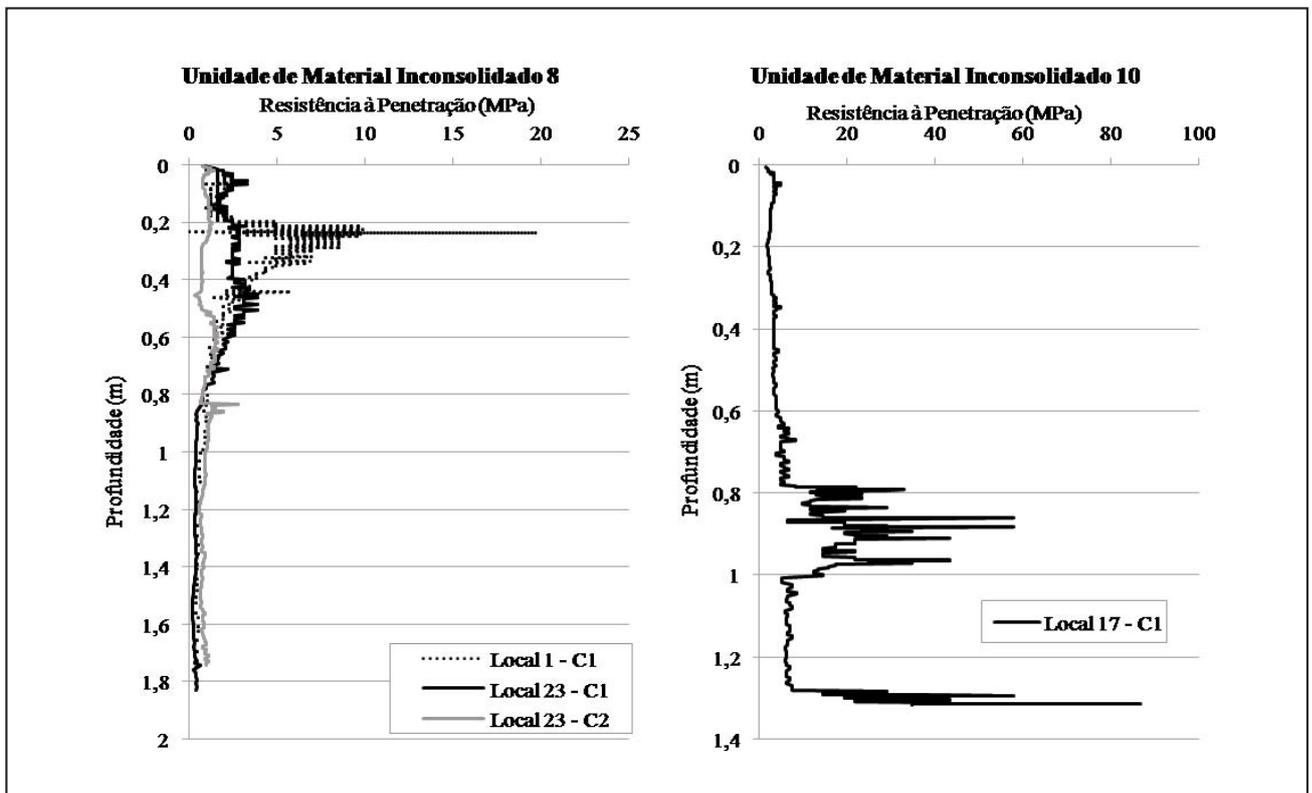


Figura 11. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 8 e 10.

Tabela 2. Análise da resistência mecânica do solo à penetração (MPa) a diferentes profundidades.

Unidade de materiais consolidados	Local	Condição de umidade do solo	Uso do Solo	Umidade (%)					Resistência à Penetração - Análises Gerais
				Profundidade (m)					
				0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0	
1	2	1	Carreador	8,95	9,30	11,65	11,14	12,38	Apresenta maior resistência nos 20 cm superficiais, com valor médio de 9,02 MPa e picos de 17,41 MPa, com gradativa redução até a profundidade de 40 cm, a partir do qual predomina-se valores de 2,0 a 3,0 MPa
				15,20	14,08	15,38	15,85	16,90	
	3	1	Cultivo de cana-de-açúcar (em pousio na época do ensaio)	9,83	10,6	9,09	8,96	7,89	Apresenta resistência média de 16,82 MPa nos 20 cm superficiais, com picos de 28 MPa, com redução para um valor médio de 5,0 MPa a partir de 40 cm de profundidade
				12	11,74	10,53	10,05	-	
4		2	Cultivo de cana-de-açúcar	6,83	8,12	1,64	-	-	Nos 10 cm superficiais, apresenta uma resistência média de 8,0 MPa, com redução para 4,0 MPa entre 10 e 20 cm, retornando à cerca de 8,0 MPa entre 20 e 40 cm; a partir de 40 cm, apresenta gradativa redução para um valor médio de 1,0 MPa
				6,68	7,63	8,81	-	-	
1a	15	1	Carreador	15,79	17,06	14,39	16,39	15,95	Apresenta um aumento de 0,24 para 0,5 MPa nos 20 cm superficiais, com resistências variando entre 0,5 a 0,7 MPa e picos de 1,5 e 1,7 MPa a partir de 20 cm de profundidade
1a	16	1	Condição natural*	10,03	12,10	12,27	13,16	-	Apresenta um valor médio de 3,3 MPa até a profundidade de 20 cm, com diminuição para cerca de 2,6 entre 20 e 60 cm, gradativa e redução para 1,0 MPa a partir de 1,0 m de profundidade
2	6	1	Cultivo de cana-de-açúcar	20,38	18,66	22,78	22,99	-	Nos 20cm superficiais, apresenta uma resistência média de 1,8 MPa, com redução para 1,0 MPa entre 20 e 65cm, voltando a aumentar para 2,5 MPa e reduzindo para uma resistência de 1,7 MPa a partir de 80 cm.
			Cultivo de cana-de-açúcar (em meio ao cultivo)	22,07	24,71	22,14	22,36	-	
	8	1	Cultivo de cana-de-açúcar (base de cordão de nível recém arado)	22,07	24,71	22,14	22,36	-	Gradativo aumento da resistência de 0,20 a 1,0 MPa nos 40 cm superficiais, com aumento para valores de 5,0 a 8,5 MPa entre 40 e 50cm,recém arado) com posterior redução gradativa para 1,0 MPa a 80 cm de profundidade

Unidade de materiais consolidados	Local	Condição de umidade do solo	Uso do Solo	Umidade (%)						Resistência à Penetração - Análises Gerais
				Profundidade (m)						
				0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0		
2	21	1	Carreador	10,38	12,20	12,93	7,91	-	Apresenta resistência entre 10 e 15 MPa nos 10 cm superficiais, com redução gradativa para 1,0 MPa a 70 cm, com pico de 19 MPa a 80 cm, e retorno a resistência média de 1,0 a 2,0 MPa a partir de 1,0 m de profundidade	
		2		17,62	13,62	-	-	-		Apresenta resistência de 1,0 a 4,0 nos 10 cm superficiais, com redução gradativa para 1,0 MPa a 60 cm, subindo para 3,5 MPa entre 70 cm e 1 m, média de 2,0 MPa a partir de 1 m de profundidade
3	5	1	Cultivo de cana-de-açúcar (próximo à base de cordão de nível)	14,30	16,13	13,48	9,72	15,69	Apresenta gradativo aumento de 0,2 para 2,0 entre 0 e 70 cm, com resistência média de 3,0 MPa entre 70 e 85 cm, e posterior redução para 0,7 MPa a partir de 1,0 m de profundidade	
		1		12,05	11,86	11,29	11,26	-		Apresenta resistência média de 3,0 MPa nos 20 cm superficiais, e um pico de 9,5 MPa a 20 cm, reduzindo para um valor médio de 0,6 MPa a partir de 80 cm de profundidade
	10	2	Carreador	11,08	10,85	10,12	9,69	-	Apresenta aumento de resistência de 1,0 a 7,0 MPa nos 20 cm superficiais, com redução para 1,0 MPa em 80 cm de profundidade	
		1		11,16	13,03	12,57	-	-		Nos 15 cm superficiais, apresenta resistências entre 10 e 15 MPa, com gradativa redução para 0,7 a 1,0 MPa a partir de 80 cm de profundidade
4	11	2	Carreador	14,80	14,45	13,42	13,88	-	Apresenta resistência média de 2,4 MPa nos 20 cm superficiais com redução gradativa ao longo do perfil do solo, com resistência de 1,0 MPa	
		1		13,38	25,83	16,76	16,97	-		Apresenta resistências entre 1,7 e 2,5 MPa nos 20 cm superficiais, com redução para 0,6 MPa a partir de 80 cm de profundidade
	13	2	Cultivo de cana-de-açúcar (próximo à base do cordão de nível)	25,04	17,23	15,01	14,99	-	Aumento brusco de 0,2 para 1,1 MPa nos 20 cm superficiais, com redução gradativa para 0,6 MPa a 1,0 m de profundidade	
		1		9,83	12,47	13,38	12,20	-		Apresenta resistência média de 4,0 MPa, com picos de 6,0 a 8,0 MPa, nos 20 cm superficiais, com gradativa redução para 0,8 MPa a partir de 60 cm de profundidade
5	20	1	Carreador	9,89	12,57	12,35	-	-	Apresenta resistências entre 11,0 a 13,0 MPa nos 15 cm superficiais, com redução para valores entre 0,8 e 1,0 MPa a partir de 80 cm de profundidade	
		1		5,83	6,35	7,08	7,46	-		Apresenta resistências médias de 5,0 a 9,0 MPa nos 20 cm superficiais, 9,0 MPa entre 20 e 45 cm e entre 1,20 e 1,40 m, e de 4,5 a 5,0 MPa entre 80 cm e 1,20 m e entre 1,6 e 1,8 m de profundidade
	7	1	Carreador	11,99	19,83	28,14	-	-	Apresenta um aumento de 5,0 a cerca de 25 MPa, com picos de 33 e 50 MPa, nos 10 cm superficiais, e gradativa redução para 1,5 a 2,0 MPa a partir de 40 cm de profundidade	

Unidade de materiais inconsolidados	Local	Condição de umidade do solo	Uso do Solo	Umidade (%)					Resistência à Penetração - Análises Gerais
				Profundidade (m)					
				0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0	
6	12	1	Carreador	9,05	13,78	-	-	-	Nos 20 cm superficiais, apresenta resistência média de 12 MPa com picos de 25 MPa, com redução para cerca de 2,0 MPa a 50 cm, apresentando novamente resistências superiores a 20 MPa, com pico de 60 MPa, com gradativa redução para cerca de 1,5 MPa a 1,4 m de profundidade
				-	-	-	-	-	
7	18	1	Pastagem	8,53	9,93	12,49	-	-	Apresenta resistência média de 5,0 MPa até a profundidade de 40 cm, com pequena redução para 3,0 MPa a partir de 40 cm
				31,41	17,50	18,59	19,88	20,17	
7	18	2	Pastagem	14,98	16,88	17,43	18,40	-	Apresenta, ao longo dos 80 cm superficiais, variações de resistência entre 0,80 a 1,3 MPa, e, a partir de 80 cm de profundidade, resistência de 1,3 MPa
				14,98	16,88	17,43	18,40	-	
8	19	1	Carreador	10,54	11,92	11,59	12,03	12,29	Apresenta resistência de 5,0 MPa entre 10 e 20 cm, com diminuição para cerca de 1,0 MPa entre 40 cm a 1,4 m, quando verifica-se aumento para 4,0 MPa e pico de 40 MPa a 1,5 m de profundidade
				10,54	11,92	11,59	12,03	12,29	
8	23	1	Pastagem	6,73	9,47	9,96	10,80	-	Nos 20 cm superficiais, apresenta resistência média de 1,7 MPa, com aumento para 9,0 a 10,0 MPa entre 20 e 30 cm, e redução gradativa para 0,7 MPa a 1,0 m de profundidade
				6,73	9,47	9,96	10,80	-	
8	23	2	Pastagem	14,49	16,27	16,10	13,70	12,20	Apresenta resistência média de 2,5 a 3,0 MPa nos 50 cm superficiais, com redução para cerca de 0,5 MPa a partir de 90 cm de profundidade
				14,49	16,27	16,10	13,70	12,20	
10	17	1	Carreador	24,71	26,72	-	-	-	Apresenta, ao longo do perfil do solo, resistência entre 0,80 MPa a 1,60 MPa, com pico de 2,8 MPa na profundidade de 85 cm
				24,71	26,72	-	-	-	
10	17	1	Carreador	24,71	26,72	-	-	-	Apresenta resistência média de 3,0 a 4,0 MPa até 75 cm de profundidade, aumentando para resistências de 20 a 24 MPa com picos de 50 MPa, reduzindo para 6,0 MPa entre 1,0 e 1,3 m e aumentando novamente para 3,0 a 4,0 MPa
				24,71	26,72	-	-	-	

Resistência mecânica do solo à penetração

As curvas de resistência mecânica à penetração ao longo do perfil do solo estão exibidas nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11. A Tabela 2 apresenta as umidades do solo determinadas por ocasião do ensaio de resistência à penetração, bem como uma breve análise do comportamento do solo frente ao citado ensaio.

Em virtude da realização do ensaio de resistência à penetração antes e após o ensaio de condutividade hidráulica por meio do duplo anel, designou-se as umidades respectivas como: condição de umidade 1 (C1): anterior ao ensaio de condutividade; condição de umidade 2 (C2): posterior ao ensaio de condutividade. A realização do ensaio em ambas as situações buscou verificar o comportamento da resistência do solo em condições de umidade natural e após saturação hídrica das camadas superficiais.

Observa-se, de maneira geral, uma maior resistência mecânica na cama de 0-20 cm de profundidade nos locais de ensaio, com destaque para os carregadores, que apresentaram valores superiores a 10 MPa e, em três casos, chegando a 30 e 60 MPa. Contudo, nos locais 19 e 17, a elevada resistência encontrada está associada ao impacto entre a base do penetrômetro e fragmentos de rocha da Formação Serra Geral, sendo esta constituinte da unidade de materiais inconsolidados do local de ensaio.

Em relação ao cultivo de cana-de-açúcar, os valores de resistência à penetração mostraram-se variados nas camadas superficiais, estando associados ao intervalo temporal entre as atividades de preparo do solo para plantio (sulcagem e subsolagem) e a realização dos ensaios. Verificou-se resistências inferiores a 5 MPa, sendo os valores mais próximos deste limite observados nos locais em que a sulcagem e subsolagem tinham ocorrido a mais tempo (8, 9, 13 e 14), enquanto que, naqueles onde o manejo do solo era recente (locais 5 e 6) os valores de resistências encontrados foram inferiores a 2,5 MPa.

Contudo, destaca-se o local 4, com resistência entre 15 a 20 MPa na camada de 0-20 cm. Além disso, o peso específico seco da camada mais superficial apresentou-se superior a média dos demais locais, com valor de 17,22 kN/m³, o que, juntamente a elevada resistência à penetração, reflete o grau de compactação elevado do solo analisado.

Nas áreas de pastagem, obteve-se valores distintos entre si, sendo que no local 18, com resistência de 5 MPa, observou-se a presença de animais em diferentes ocasiões, enquanto que no local 23, com resistência inferior a 3 MPa, não constatou-se tal presença, possibilitando inferir sobre tal diferença de valores, uma vez que o pisoteio de animais está entre as principais causas da compactação de solos agrícolas. O peso específico seco acompanhou a diferença entre as resistências, mostrando-se superior no local 18 (15,90 kN/m³) em relação ao local 23 (15,36 kN/m³).

Na área sob reflorestamento com eucalipto, local 22, a resistência à penetração mostrou-se superior a 5 MPa ao longo de quase todo o perfil analisado do solo, compreendendo valores entre 6 MPa e 8 MPa na camada 10-60 cm. Uma outra área da Bacia de estudo, também pertencente à unidade de materiais inconsolidados 4 e sob reflorestamento, apresentou peso específico seco de 16,28 kN/m³ na profundidade de 30-40 cm, e de 25,63 kN/m³ na profundidade de 80-100 cm, indicando que, no caso destes materiais e sob o mesmo uso do solo, o aumento da resistência mecânica também é verificado em camadas mais profundas.

Como dito anteriormente, os carregadores apresentaram, de maneira geral, as maiores resistências à penetração. O local de ensaio 7, referente à unidade 5, apresentou a maior resistência mecânica na camada 0-20 cm, chegando a valores de 30 MPa e picos de 50 MPa. Essa elevada resistência está associada às características do material inconsolidado, influenciado por condições naturais de fluxo de água que, juntamente ao tráfego de maquinários, acarreta o aumento do peso específico do solo e em maiores graus de compactação quando comparados a outros carregadores da bacia.

Os locais 15 e 16, distantes cerca de 10 m, também possibilitam uma boa comparação entre condições distintas de uso do mesmo solo. Enquanto o local 15, carregador, apresenta resistência média próxima a 9 MPa nos 40 cm superficiais, o local 16, condição natural, apresenta valores inferiores a 2 MPa na mesma profundidade, sendo a resistência de ambos aproxima-se a 1 MPa a partir de 1 m de profundidade.

Nos locais onde realizou-se previamente o ensaio de condutividade hidráulica, com adição de água ao solo, constatou-se, na maioria dos casos, redução da resistência à penetração. Em alguns pontos, tal redução ocorreu de maneira mais acentuada, como nos locais 11 e 21, os quais apresentaram uma diminuição de 15 MPa para cerca de 3 MPa, na camada 0-20 cm. Por outro lado, os locais 13 e 23, por exemplo, mostraram uma redução menos brusca, de 2,5 MPa para 1 MPa. O local 10, entretanto, com um aumento de resistência na camada 15-30 cm de 3 MPa, na condição natural, para 6 MPa, após ensaio de condutividade hidráulica, mostrou-se contrário aos demais.

Assim, analisando o comportamento da resistência à penetração nas duas condições de umidade, verifica-se a dependência da resistência em relação à umidade do solo. Em condições de umidade reduzida, observou-se, de maneira geral, maiores valores de resistência. Ao contrário, com o aumento considerável do teor de água, há uma considerável redução na resistência à penetração, uma vez que a água atua entre as partículas do solo, refletindo no decréscimo das forças de coesão e de atrito interno.

Devido a maior compactação, as estradas e carregadores são geradores de alto escoamento superficial drenado para as encostas, condicionando, juntamente com a predominância de materiais arenosos, feições erosivas de dimensões e intensidades variadas, como verificou-se em toda a bacia. De maneira geral, observou-se na área de estudo uma série de feições erosivas lineares, variando desde sulcos a grandes voçorocas, de cerca de 20 metros de largura, até 50 metros de comprimento e 4 metros de profundidade. As feições de maiores dimensões localizam-se, em sua maioria, nas cabeceiras dos canais de drenagem, enquanto, nas encostas, a montante de cordões de nível são observados apenas sulcos e ravinas. Algumas dessas feições são apresentadas na Figura 12.

CONCLUSÕES

A realização do ensaio de resistência mecânica à penetração por meio do penetrômetro dinâmico, em conjunto com a obtenção do teor de umidade e caracterização dos materiais geológicos, possibilitou a análise dos efeitos associados a compactação do solo provocados pelo uso agrícola da área de estudo.

Os maiores valores de resistência à penetração encontrados estão associados a carregadores, indicando maiores graus de compactação e condicionando uma redução das taxas de infiltração e conseqüente aumento do escoamento superficial. Nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, foram encontrados valores

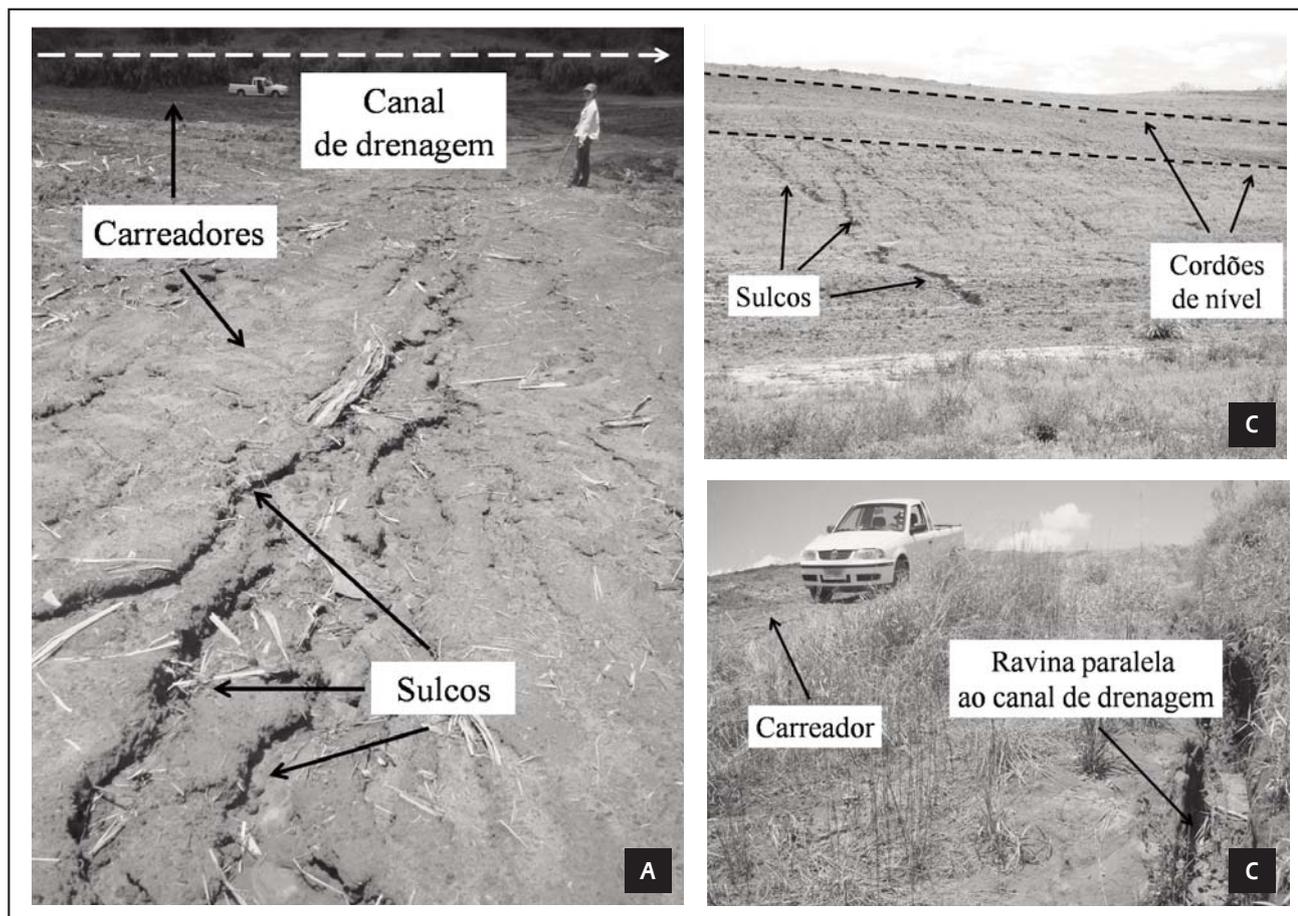


Figura 12. Feições erosivas encontradas próximas as estradas e carreadores em diferentes pontos da Bacia: A: Sulcos em carreador, descontínuos e perpendiculares ao canal de drenagem; B: Diversos sulcos em encosta; C: Ravina paralela ao carreador e continua ao canal de drenagem.

inferiores aos de carreadores, derivado, principalmente, das atividades de manejo solo por maquinário e implementos agrícolas. As áreas de pastagens também apresentaram resistência inferiores, diferindo entre si em função da presença e circulação de animais, ocasionando a compactação por pisoteio.

A resistência mecânica a penetração mostrou-se profundamente influenciada pela umidade do solo, onde o aumento da umidade em camadas mais profundas bem como a adição de água, em ocasião do ensaio de condutividade hidráulica, provocaram redução da resistência.

A utilização do solo para fins agrícolas e consequentes técnicas de cultivo empregadas, associadas às características dos

materiais geológicos podem ser apontadas como principais fatores para o processo de compactação do solo, oriundo do tráfego de maquinários e alteração da distribuição de materiais inconsolidados, com exposição de materiais menos evoluídos geneticamente.

Em decorrência deste processo, ocorre a alteração na dinâmica das águas, sobretudo na razão infiltração/escoamento superficial, verificada em toda a área de estudo, desencadeando processos erosivos de grandes dimensões e também a modificação de toda a dinâmica de recarga, com prejuízos econômicos e ambientais.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. (1990).

Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of soil science*, v. 41, n. 3, p. 341-358.

BENNIE, A.T.P. E KRYNAUW, G.N., (1985).

Causes, adverse effects of soil compaction. *South African Journal Plant Soil* 2, p.109-114.

CASSAN, M. (1982).

Los Ensayos in Situ em la Mecânica del Suelo. *Barcelona: Editores Técnicos Associados, S.A.* p. 139-166.

- DAVIES, S., LACEY, A., (2011).
Subsurface compaction: A guide for WA farmers and consultants.
Department of Agriculture and Food, Western Australia.
- DUIKER, W. S., (2004).
Effects of soil compaction. Agricultural Research and Cooperative Extension.
College of Agricultural Sciences. Pennsylvania State University.
- FUREGATTI, S. A. (2012).
Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ.
Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HERRICK, J. E., & JONES, T. L. (2002).
A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance.
Soil Science Society of America Journal, 66(4), 1320-1324.
- KOEPPEL, W. (1948).
Climatología, com um Estudo de los Climas de la Tierra.
Mexico: Fondo de Cultura Economica, 478p.
- MANTOVANI, E. C., (1987).
Compactação do solo.
Informe Agropecuário, Belo Horizonte 13.147: 52-55.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. E REINERT, D. J., (2007).
Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação.
Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134.
- VANAGS, C.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. (2004).
The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance.
In: Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference. p. 5-9.