

ATRIBUTOS FÍSICOS, MECÂNICOS E DINÂMICOS DO SOLO COMO INDICADORES DO IMPACTO DO CULTIVO E DO TRÁFEGO EM PERÍMETROS IRRIGADOS

Reginaldo Barboza da Silva; Kléber Pereira Lanças; Virgínia Maria F. Cardoso; Elka Élice V. de Miranda

*Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, SP
rbsilva@fca.unesp.br*

1 RESUMO

Este trabalho teve por objetivos investigar o impacto do cultivo e do tráfego, solicitado por rotações de culturas, sobre a estrutura do solo em perímetros irrigados da região do Alto Paranapanema (SP). Isto foi feito por meio de modelagem e avaliação da variabilidade espacial de propriedades físicas, mecânicas e dinâmicas, cujos principais atributos foram: densidade do solo, porosidade, pressão de contato e pressão de preconsolidação. Os pulverizadores autopropelidos e as colhedoras foram os equipamentos que mais aplicaram pressão ao solo. As propriedades físicas do solo, especialmente a densidade do solo e a porosidade obtidas das áreas dos dois perímetros, se mostraram bons indicadores do elevado estado de compactação das duas camadas de solo avaliadas. Os modelos de capacidade de suporte estimaram satisfatoriamente a pressão de preconsolidação em função da umidade do solo, permitindo com que fossem identificadas em cada área, a camada de maior resistência mecânica e, conseqüentemente, a mais afetada pelo tráfego e preparo do solo. Os mapas de pressão de preconsolidação e dos teores de água do solo se mostraram excelentes ferramentas para localizar e visualizar zonas compactadas ou de elevada resistência mecânica. Eles se constituíram um importante recurso para avaliar o impacto do tráfego agrícola sobre a estrutura de solos que estão constantemente sob as práticas de irrigação.

UNITERMOS: compactação do solo, pressão de contato, pressão de preconsolidação, preparo do solo, irrigação.

**SILVA, R. B. da; LANÇAS, K. P.; CARDOSO, V. M. F.; MIRANDA, E. E. V. de.
PHYSICAL, MECHANICAL AND DYNAMIC SOIL PROPERTIES USED AS
INDICATORS OF TILLAGE AND TRAFFIC IMPACT ON IRRIGATED FIELDS**

2 ABSTRACT

The objectives of this work were to investigate the impact of soil tillage and traffic, required in crop rotations, on the soil structure of irrigated field perimeters in the Alto Paranapanema Region (SP - Brazil). This study was conducted by modeling and evaluating the spatial variability of physical, mechanical and dynamic soil properties as bulk density, porosity, contact pressure and pre consolidation pressure. Self-propelled sprayers and harvesters were the pieces of equipment that mostly applied pressure on the soil. The soil physical properties, especially the bulk density and porosity, are good indicators of the high

compaction level of the two soil layers evaluated. The applied support capacity models estimated satisfactorily the pre consolidation pressure in relation to soil moisture, identifying the layer with highest mechanic strength, and consequently, most affected by traffic and soil tillage in each area. Pre consolidation pressure and soil moisture maps became excellent tools to locate and visualize compacted zones or with high mechanical strength. These maps are considered an important resource to evaluate the impact of the agricultural traffic on soil structure, which is constantly under irrigation practice.

KEYWORDS: soil compaction, contact pressure, pre consolidation pressure, soil tillage, irrigation.

3 INTRODUÇÃO

No Brasil, as extensas áreas agrícolas com características de solo, relevo e clima peculiar, têm favorecido que a mecanização agrícola seja praticada de forma exaustiva, e quase sempre, de forma inadequada, não respeitando a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) e muito menos a umidade ideal de tráfego. Esta forma de trabalhar os solos não é tecnicamente correta e muito menos, ecologicamente sustentável.

Na última década, com o avanço da Agricultura de Precisão (AP), novas técnicas e métodos, tanto de laboratório quanto de campo, têm contribuído para um novo enfoque da avaliação da estrutura dos solos agrícolas. Em grandes áreas, sejam de culturas ou florestas, anuais ou perenes, a simples avaliação da relação massa/volume (densidade do solo), atributo ainda amplamente utilizado como indicador da compactação, tem cedido espaço a outras alternativas de estudos, entre as quais está o desenvolvimento de modelos de predição da Capacidade de Suporte de Carga do Solo (Dias Junior, 1994; Silva, 2002; Silva, 2003a; Silva, 2003b; Silva et al., 2005). Esta forma de avaliar os efeitos do tráfego sobre a estrutura do solo tem preconizado como novos indicadores a estimativa de uma importante propriedade mecânica do solo, a pressão de preconsolidação (σ_p).

Para a obtenção de σ_p , amostras indeformadas de dimensões de 2,5 x 6,0 cm de altura e diâmetro, respectivamente devem ser submetidas aos ensaios uniaxiais usando um consolidômetro, seguindo metodologias específicas (Dias Junior & Pierce, 1995; Silva 2002; Silva et al., 2005), que preconizam a aplicação dos seguintes níveis de pressão: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, até que 90% da deformação máxima na amostra seja obtida (Taylor, 1948).

Com as informações de deformação do solo, que podem ser tanto o índice de vazios do solo, quanto a densidade do solo, obtidas em função de logaritmo dos níveis de pressão aplicados à amostra, traça-se a curva de compressão do solo, da qual é estimada σ_p . Entre os mais variados métodos está o “método gráfico de Casagrande” (1936). Este método é baseado na escolha do ponto de raio mínimo ou de máxima curvatura da curva de compressão do solo. Entretanto, alguns pesquisadores têm verificado que à medida que aumentam as perturbações na amostra, ou quando esta é submetida aos ensaios de compressibilidade com alta umidade, torna-se difícil a escolha do ponto de máxima curvatura, pois as curvas de compressão do solo tendem a ficar lineares. Por isso, para Dias Junior & Pierce (1996), este método apresenta grande subjetividade. Como alternativa propuseram dois métodos (M1 que pressupõe que as amostras sejam consolidadas a teores de água referentes a tensões abaixo de 100 kPa; e o M3 que pressupõe que as amostras sejam consolidadas a teores de água referentes a tensões acima

de 100 kPa) os quais se baseiam numa planilha eletrônica de fluxo livre para estimar a pressão de preconsolidação.

Embora avaliada em laboratório, a σ_p têm sido regionalizadas através de GPS (Sistema de Posicionamento Global), e mapas temáticos e de aplicação, associados aos modelos preditivos que são ajustados em função do teor de água, tem se constituído em poderosas ferramentas nos estudos de interação máquina-solo. Essas informações, agregadas ao conhecimento das pressões de contato exercidas no solo pelo tráfego têm permitido melhorar a adequação do parque de máquinas das propriedades e, por conseguinte, preservar a estrutura do solo, já que este novo conceito de avaliar a estrutura do solo permite que seja respeitada a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS).

Em áreas irrigadas, nem sempre o solo tem sido trabalhado em condições de umidades adequadas, e isto tem deixado o solo em um estado crítico de consolidação. Todavia, estas constatações têm como referência na sua grande maioria, interpretações levando em conta apenas os valores de densidade e solo, e desta forma, tem sido difícil para os produtores de perímetros irrigadas do Estado de São Paulo adotar estratégias de ação que proporcionem em manejos futuros, evitar danos à estrutura dos seus solos.

Este trabalho teve por objetivos investigar o impacto do cultivo e do tráfego, solicitado por rotações de culturas, sobre a estrutura do solo em perímetros irrigados da região do Alto Paranapanema (SP).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental e do solo

Quadro 1. Sucessão de culturas e épocas de plantio nas áreas irrigadas avaliadas.

Área	Época de plantio	Cultura
Perímetro 1 (74 ha)	2º Semestre de 2001 (2ª quinzena de dezembro)	feijão
	1º Semestre de 2002 (1ª quinzena de agosto)	algodão
	2º Semestre de 2002 (1ª quinzena de dezembro)	milho
	1º Semestre de 2003 (2ª quinzena de outubro)	feijão/trigo
	2º Semestre de 2003 (2ª quinzena de abril)	algodão.
Perímetro 2 (35 ha)	1º Semestre de 2001 (1ª quinzena de agosto)	feijão/aveia
	2º Semestre de 2001 (2ª quinzena de janeiro)	milho comercial
	1º Semestre de 2002 (1ª quinzena de setembro)	feijão
	1º Semestre de 2003 (2ª quinzena de outubro)	feijão/trigo
	2º Semestre de 2003 (2ª quinzena de fevereiro)	milho/semente

O estudo foi desenvolvido em dois perímetros irrigados da região do Alto Paranapanema, município de Holambra, do Estado de São Paulo. Os dois perímetros compreendem solos de mesma classe textural, isto é, franco arenosa e de acordo com a EMBRAPA (1999), o solo foi classificado como um Argissolo Acinzentado. No perímetro 1, a distribuição granulométrica

foi de 151; 128 e 721 g kg⁻¹ para argila, silte e areia, respectivamente. O diâmetro médio ponderado (DMP) encontrado foi de 3,06 mm e o teor de matéria orgânica (MO) de 14 g dm⁻³. No perímetro 2, a distribuição granulométrica foi de 190 g kg⁻¹ para argila; 138 g kg⁻¹ para silte e 672 g kg⁻¹ para areia. O teor de MO foi 7 g dm⁻³ e o DMP de 2,48 mm. No Quadro 1 está apresentado o histórico de cultivo das áreas dos dois perímetros e suas respectivas rotações de culturas.

Variáveis avaliadas

Neste estudo foram avaliadas às propriedades que apresentam interdependência com a estrutura do solo, possibilitando assim, um melhor entendimento do processo de compactação do solo dando bem como da sua modelagem.

As propriedades físicas do solo, avaliadas conforme metodologias da EMBRAPA (1997) foram: Densidade do solo inicial (Dsi), Densidade do solo na pressão de preconsolidação (D_{s(p)}), Porosidade do solo inicial (Pi), Porosidade do solo na pressão de preconsolidação (P_p) e teor de água do solo atual (W).

A Dsi, avaliadas pelo método do anel volumétrico, buscou avaliar o estado natural do solo, isto é, manter o histórico do manejo do solo. Na avaliação da D_{s(p)}, as amostras indeformadas receberam pressões equivalentes à pressão de preconsolidação (p_p), e buscou-se quantificar o grau de consolidação máxima (crítica) que o solo pode atingir, sem que a sua estrutura fosse comprometida de forma irremediável.

A Pi, assim como a Dsi, foi avaliada levando em conta o estado natural do solo, e a P_p a sua determinação foi feita após o solo receber pressões equivalentes à pressão de preconsolidação, que simulou a pressão de contato máxima que pode ser aplicada ao solo sem implicar em danos irreversíveis à sua estrutura. Neste estudo, a forma de interpretar esta propriedade assim como a Dsi está sendo sugerida como um indicativo do quanto de espaços de vazios (porosidade mínima ou crítica) ou a relação massa/volume o solo pode atingir, de maneira que a sua estrutura não seja comprometida.

Os Limites de consistências do solo foram determinados de acordo com Sowers (1965) e Bowles (1986) e representam o teor de água do estado de consistência em que o solo se encontra (Figura 1). São eles os limites de liquidez (LL), de plasticidade (LP) e de contração (LC). É a partir destes limites identificaram-se os estados ou regiões de consistência importantes para o tráfego agrícola ou preparo do solo: a) região de friabilidade (RF) que representa a faixa de umidade entre o limite de contração e o limite plástico, e b) região de plasticidade (RP), que representa a faixa de umidade entre o limite plástico e o limite de liquidez.

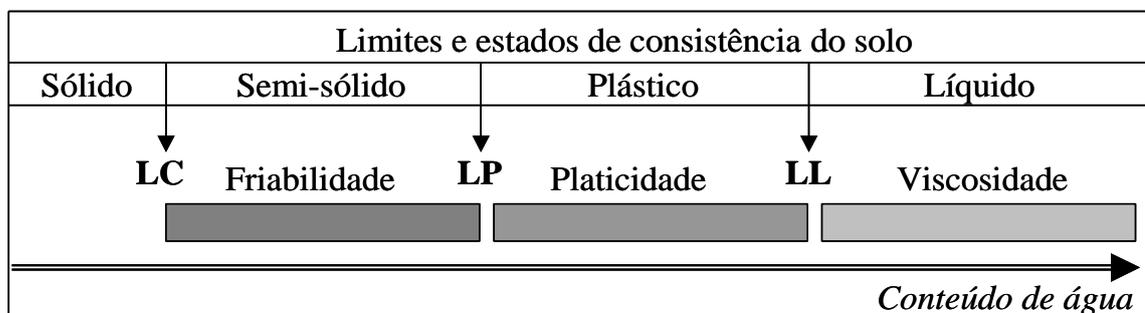


Figura 1. Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. LC: limite de contração; LP: Limite de plasticidade; LL: limite de liquidez. (Fonte: Silva, 2002).

A Pressão de preconsolidação (σ_p), a qual representa a pressão máxima que o solo pode suportar sem que sofra compactação adicional foi obtida de acordo com sugestões de Silva et al., (2005), como mostrado na Figura 2, e estimada conforme metodologia de Dias Junior (1994). Foi através dela que obtiveram-se os modelos de CSCS que em função do teor de água no solo foi possível identificar que pressão de contato poderá ser aplicada ao solo, tendo a garantia, teoricamente, de que está sendo preservada a estrutura do solo.

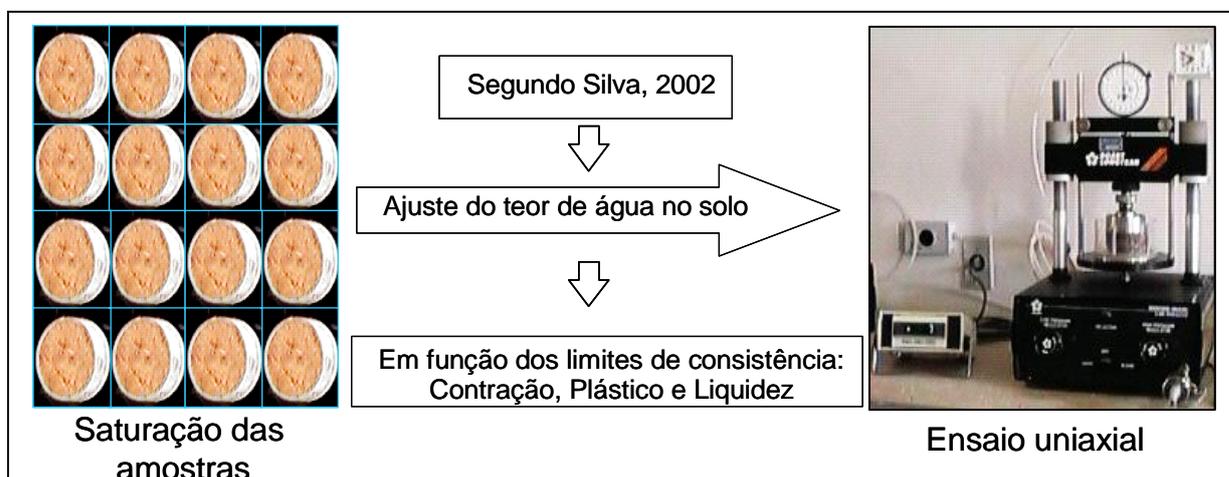


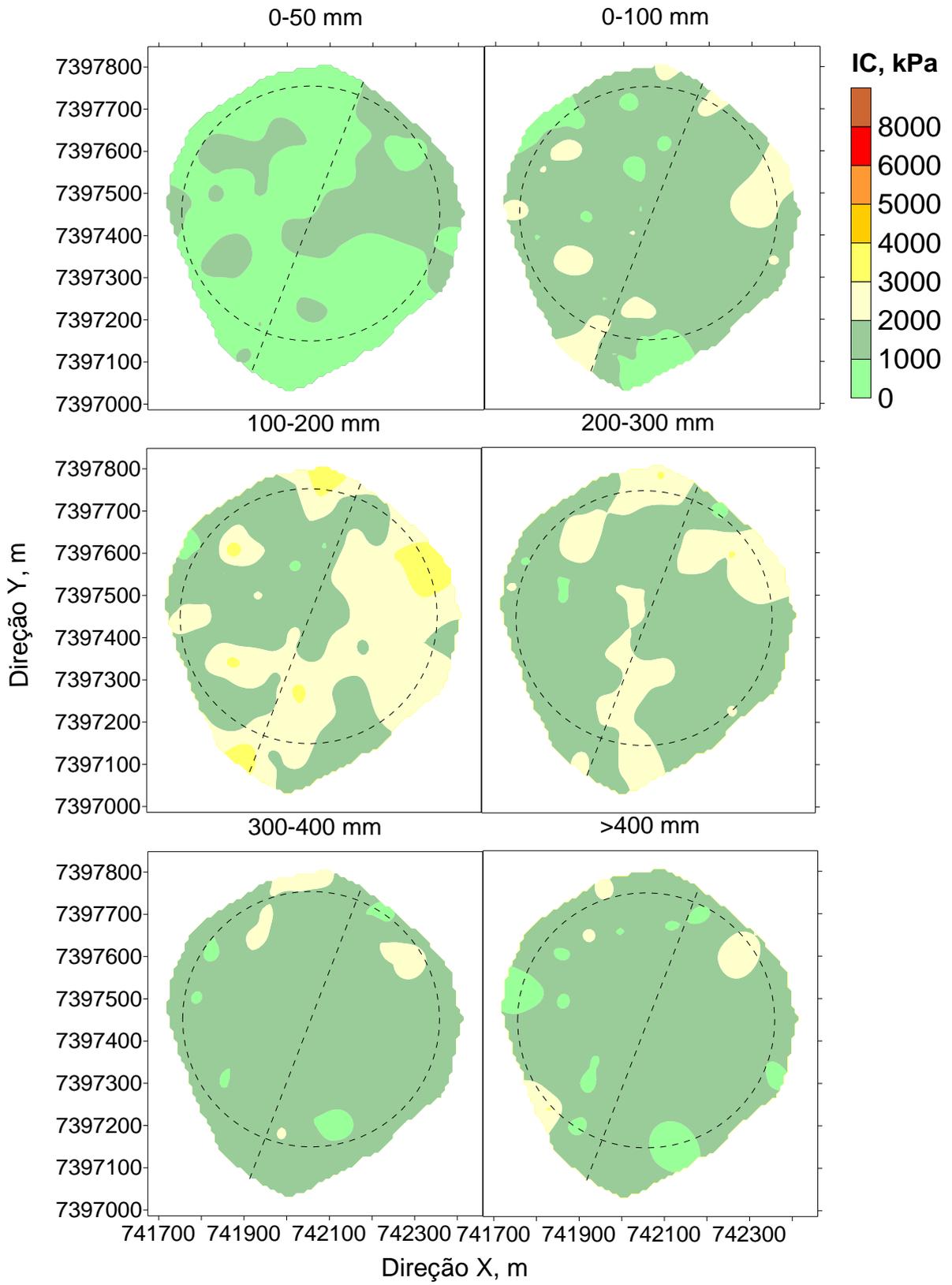
Figura 2. Procedimentos em laboratório para realização dos ensaios de compressibilidade. Da esquerda para a direita: acertar as amostras; equilibrar as amostras às umidades de interesse em função dos limites de consistência e por fim, submetê-las aos ensaios uniaxiais. (Fonte Silva et al., 2005)

A área de contato (AC) foi avaliada pelos métodos da elipse de Hallonborg (1996) e gráfico, de Mazetto & Lanças (2000), os quais foram corrigidos, segundo a proposição de Silva et al. (2003) A Pressão de contato (PC) foi obtida a partir relação entre a força e a área, isto é, peso dos equipamentos ou rodados, divididos pela área de contato impressa ao solo.

Épocas de amostragem e camadas de solo avaliadas

Na área do perímetro 1, a coleta de amostras indeformadas visando garantir a manutenção da estrutura e da umidade atual da amostra, foi feita na segunda quinzena de abril. A qual objetivou verificar o efeito do tráfego e dos preparos anteriores especificamente, o do algodão, sobre a estrutura do solo. Na Área do perímetro 2, a coleta de amostras foi feita no ano de 2003 na segunda quinzena de fevereiro, possibilitando avaliar o impacto do tráfego e do cultivo solicitado para produção do milho-semente.

Duas camadas de solo foram avaliadas: a) superficial (SP – 0 a 100 mm) e subsuperficial (CMRM - camada de maior resistência mecânica, que foi avaliada previamente através da quantificação do índice de cone, IC). A identificação desta camada foi feita através do uso de um penetrômetro hidráulico-eletrônico com sistema de posicionamento global, desenvolvido por Lanças & Santos (1998). A Figura 3 apresenta a variabilidade espacial do índice de cone (IC) em função do espaço e da profundidade das áreas dos dois perímetros.



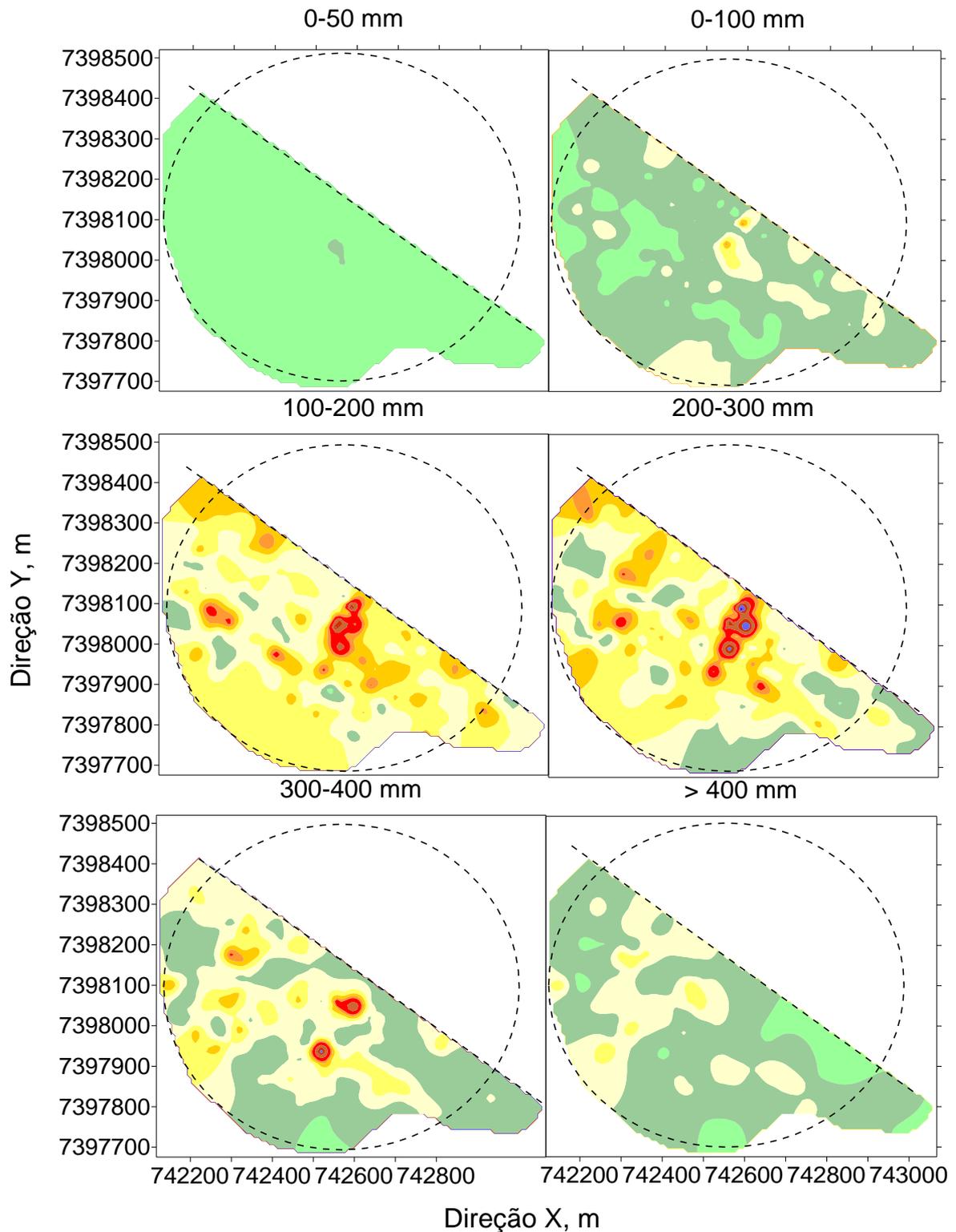


Figura 3. Distribuição espacial dos valores de índice de cone (IC) em diferentes camadas de solo das áreas do perímetro 1 (à esquerda) e do perímetro 2 (à direita).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pressões de contato aplicadas ao solo

O levantamento das pressões de contato dos principais tratores e máquinas agrícolas que foram utilizados nas áreas em estudo está apresentado no Quadro 2.

Quadro 2. Valores de pressão de contato máxima, corrigidos segundo a proposição de Silva et al. (2003d), exercida no solo pelas máquinas e equipamentos agrícolas utilizadas nas áreas em estudo.

Máquina/Equipamento*	Pressão de Contato			
	Frontal		Traseiro	
	kgf cm ⁻²	kPa	kgf cm ⁻²	kPa
Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA	2,582	253	2,761	271
Trator Massey Ferguson 292 4x2 TDA	1,977	194	2,787	273
Trator Massey Ferguson 299 4x2 TDA	2,723	267	2,787	273
Trator John Deere 6405 4x2 TDA	2,582	253	2,336	229
Trator John Deere 7500 4x2 TDA	1,977	194	2,206	216
Trator New Holland TM 150 4x2 TDA	3,155	309	3,699	363
Pulverizador Autopropelido. Max Sistem Plat.290 4x2 tda	3,247	318	3,391	332
Pulverizador Autopropelido. Max Sistem Plat.6600 4x2	3,236	317	2,766	271
Pulverizador Autopropelido. UNIPORT Jacto 4x2	4,127	405	4,606	452
Colhedora Cereais Massey Ferguson 5650 4x2	3,386	332	3,218	316
Colhedora Cereais John Deere 1175 4x2	3,695	362	2,879	282
Colhedora Algodão John Deere 9935 4x2	3,484	342	3,041	298

*Nomes de marcas e, ou equipamentos citados neste estudo não representam indicações ou recomendações por parte dos autores.

Impacto do tráfego sobre a estrutura do solo

Os valores de densidade inicial do solo (D_{si}) para ambas as camadas avaliadas do perímetro 1 (Figura 4) variaram de 1,20 a 1,60 g cm⁻³, muito embora seja observado em toda a área o predomínio de valores de densidade entre 1,30 e 1,50 g cm⁻³. Apesar do solo desta área ter grande contribuição de areia e silte, estes valores são extremantes elevados, especialmente por se tratar de solos cultivados com culturas anuais. Na parte central da área é notório uma mancha de solo cujos valores de densidade estão entre 1,40 e 1,50 g cm⁻³, evidenciando o impacto do tráfego (rodados ou implementos), tanto na profundidade SP como CMRM. Estes valores, portanto, indicam a elevada resistência mecânica que é corroborada pelos valores de índice de cone (IC), apresentado na Figura 3. A maior variabilidade do IC da CMRM foi verificada entre 100 e 400 mm, mas foi na camada 200 a 300 mm que se observaram os maiores valores de IC, evidenciando o “pé de grade ou pé de arado” e, provavelmente a regulagem indevida da profundidade efetiva de trabalho destes equipamentos. Ainda com referência à Figura 4 (à direita), estão os mapas das profundidades para a densidade do solo referente à pressão de preconsolidação ($D_{s(p)}$). Os valores variaram de 1,20 a 1,50 g cm⁻³ para a SP e de 1,20 a 1,80 g cm⁻³ para a camada CMRM. Do ponto de vista estrutural, isto é um indicativo do limite que a densidade deste solo pode chegar e não ter, teoricamente, a sua estrutura comprometida. Trabalhos conduzidos por Silva et al. (2004) estudando a

variabilidade espacial da D_{si} e $D_{s\sigma_p}$, também constataram o impacto do tráfego sobre a estrutura de solos cultivados com cana-de-açúcar e propuseram o uso da $D_{s\sigma_p}$ como indicador da densidade crítica do solo. Todavia, deve ser ressaltado, que necessariamente, o que pode ser aceitável para o solo, pode não ser para planta. Neste caso, o produtor deve estar atento também, ao histórico de produtividade da sua área e assim, tomar as decisões que melhor lhe convier.

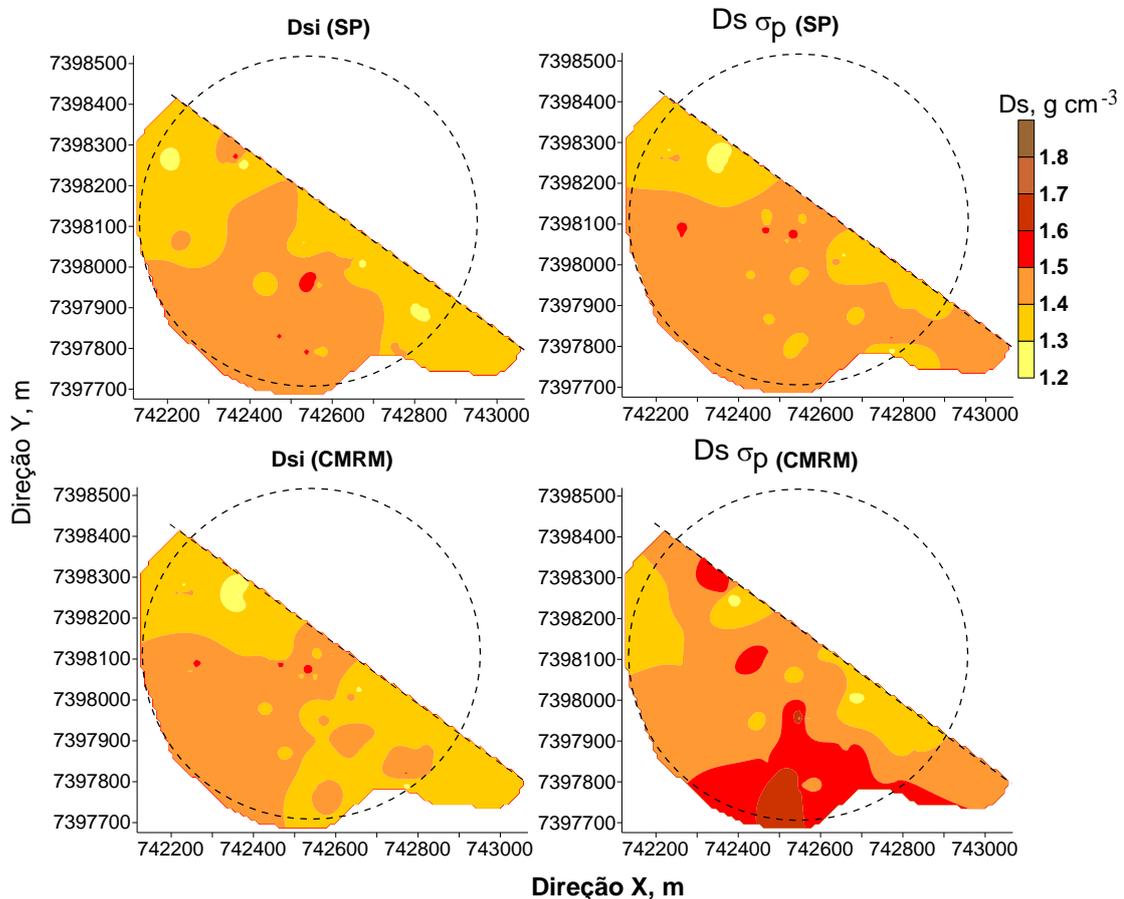


Figura 4. Distribuição espacial dos valores de densidade do solo (g cm^{-3}) inicial (D_{si}) e referente à pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$) do perímetro 1.

A distribuição espacial dos valores de porosidade se constitui também uma importante fonte de informação para o produtor. Na Figura 5, se observou que na quase totalidade da área predominou valores da ordem de 0,40 a 0,60 m^3m^{-3} para a porosidade inicial em ambas as camadas de solo. Amostras de solo da área após receberem carregamentos equivalentes à pressão de preconsolidação, não tiveram a sua porosidade muito alterada, especificamente na CMRM, denotando, assim como já observado para a D_{si} , o alto grau de consolidação da estrutura do solo desta área.

A avaliação da sustentabilidade da estrutura do solo do perímetro 1 foi feita através de modelos da capacidade de suporte de carga (CSCS), obtidos através da estimativa de σ_p em função da umidade do solo (Figura 6). Observa-se que a CSCS em resistir carregamentos (pressões de contato), indicados pelos valores de σ_p , é diminuída quando se aumenta o teor de água no solo.

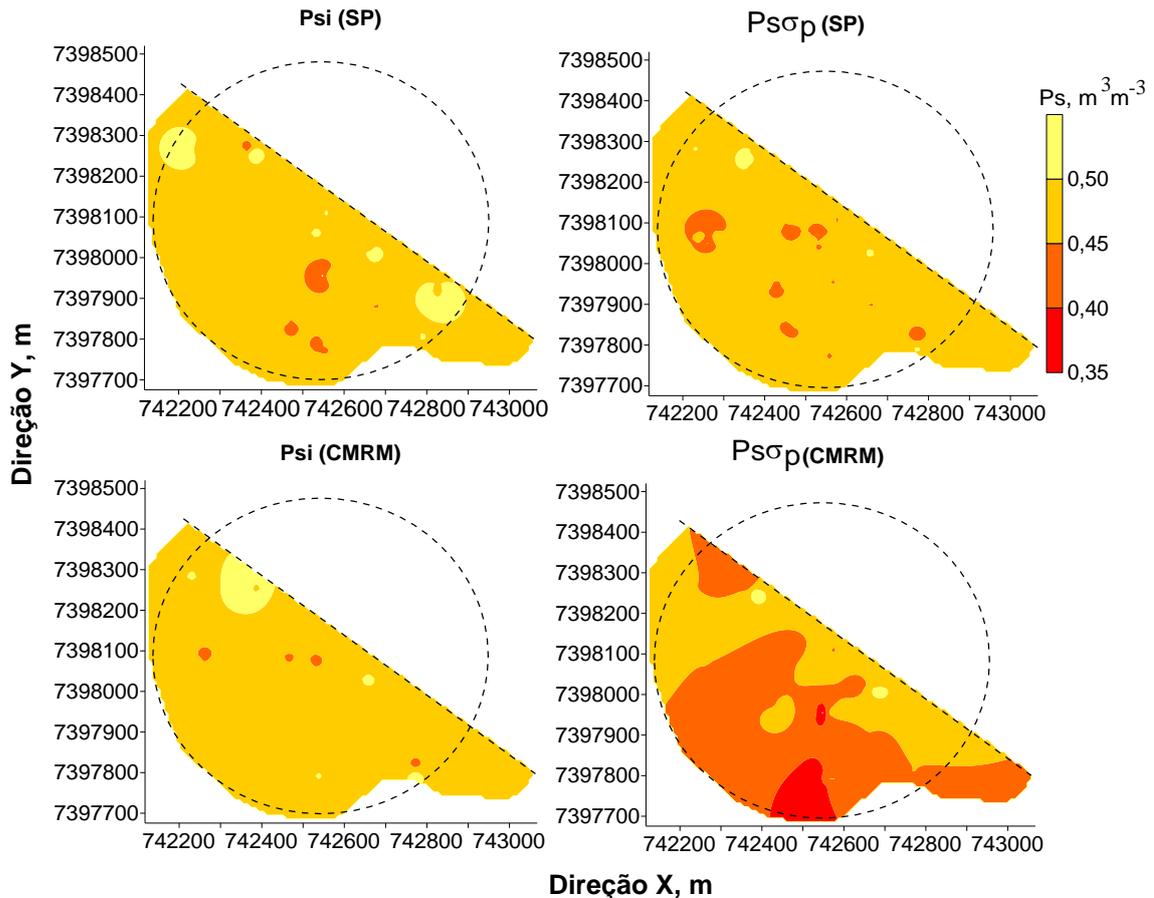


Figura 5. Distribuição espacial dos valores de porosidade do solo inicial (Ψ_i) e da porosidade referente à pressão de preconsoidação (Ψ_{σ_p}), do perímetro 1.

Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2003) e Silva et al. (2004). Em áreas irrigadas, como é o caso, cuidados devem ser redobrados com o tráfego, principalmente, depois dos turnos de rega. A CMRM apresenta-se mais consolidada, como se observa pelo comportamento das curvas, apresentadas na Figura 6. A exemplo da densidade e da porosidade, a σ_p corrobora o impacto do tráfego dos rodados e dos equipamentos sobre a estrutura do subsolo do perímetro 1. Este modelo apresenta como vantagem prever o quanto de carga o solo pode suportar em função da umidade em que ele se encontra.

Tomando como referência as pressões de contato aplicadas por dois pulverizadores (caracterizados no Quadro 2), ambos comprometeriam a estrutura do solo da camada SP, já que esta profundidade apresenta menor capacidade de suporte do que a CMRM. Portanto, neste caso o dimensionamento do equipamento ou do conjunto mecanizado para esta operação, deverá levar em conta as informações da camada SP.

De acordo com os modelos de CSCS obtidos para ambas as profundidades, o recomendado seria que apenas o pulverizador autopropelido Max Sistem Plat trafegasse nesta área, ressaltando que a umidade máxima que este solo deva estar seja de aproximadamente $0,12 \text{ kg kg}^{-1}$, teor de água que curiosamente está dentro da região de friabilidade (RF) deste solo. O tráfego do pulverizador autopropelido Jacto só seria admitido para um teor de água de aproximadamente $0,07 \text{ kg kg}^{-1}$, contexto em que o solo estar totalmente em um estado de tenacidade, e neste caso apenas a CMRM não teria a sua estrutura comprometida.

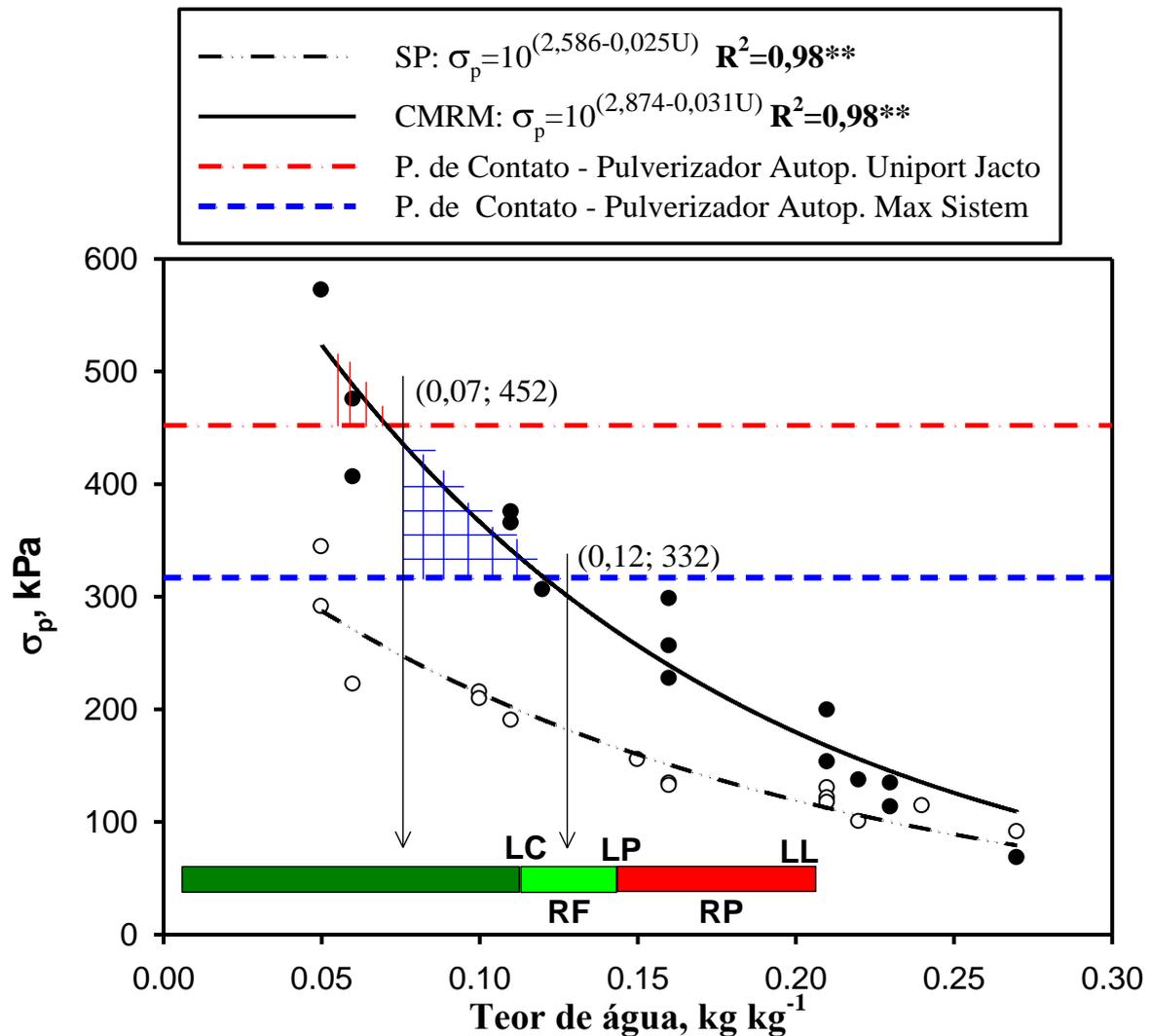


Figura 6. Modelos de capacidade de suporte de carga para duas camadas de solo com seus respectivos limites e estados de consistência do solo. Linhas de referência indicam a pressão de contato dos rodados de dois pulverizadores.

Mapas que mostram a variabilidade espacial de σ_p (Figura 7) foram também obtidos e permitiram uma melhor visualização da distribuição espacial CSCS da área do perímetro 1. Percebe-se que a camada SP, apesar de apresentar valores acima de 400 kPa, eles se restringem a pequenas partes da área, predominando entretanto, valores da ordem de 200 a 300 kPa. Todavia, na CMRM, observa-se que em quase toda a área, a σ_p ficou entre 300 e 400 kPa e com pequenas regiões apresentando valores da ordem de 400 a 500 kPa. As informações fornecidas pelos mapas permitem ao produtor definir a que profundidade a sua área deverá ser mecanizada (se o objetivo for romper a resistência mecânica do solo), e também dá uma idéia que parte da área solicitará uma maior potência do conjunto mecanizado a ser utilizado e, por conseguinte, maior consumo energético. Com base nessas informações, decisões quanto ao tipo de operação (se uma aração ou uma subsolagem) podem ser tomadas com perspectivas de maior acerto, tanto do ponto de vista da estrutura do solo, quanto do consumo energético.

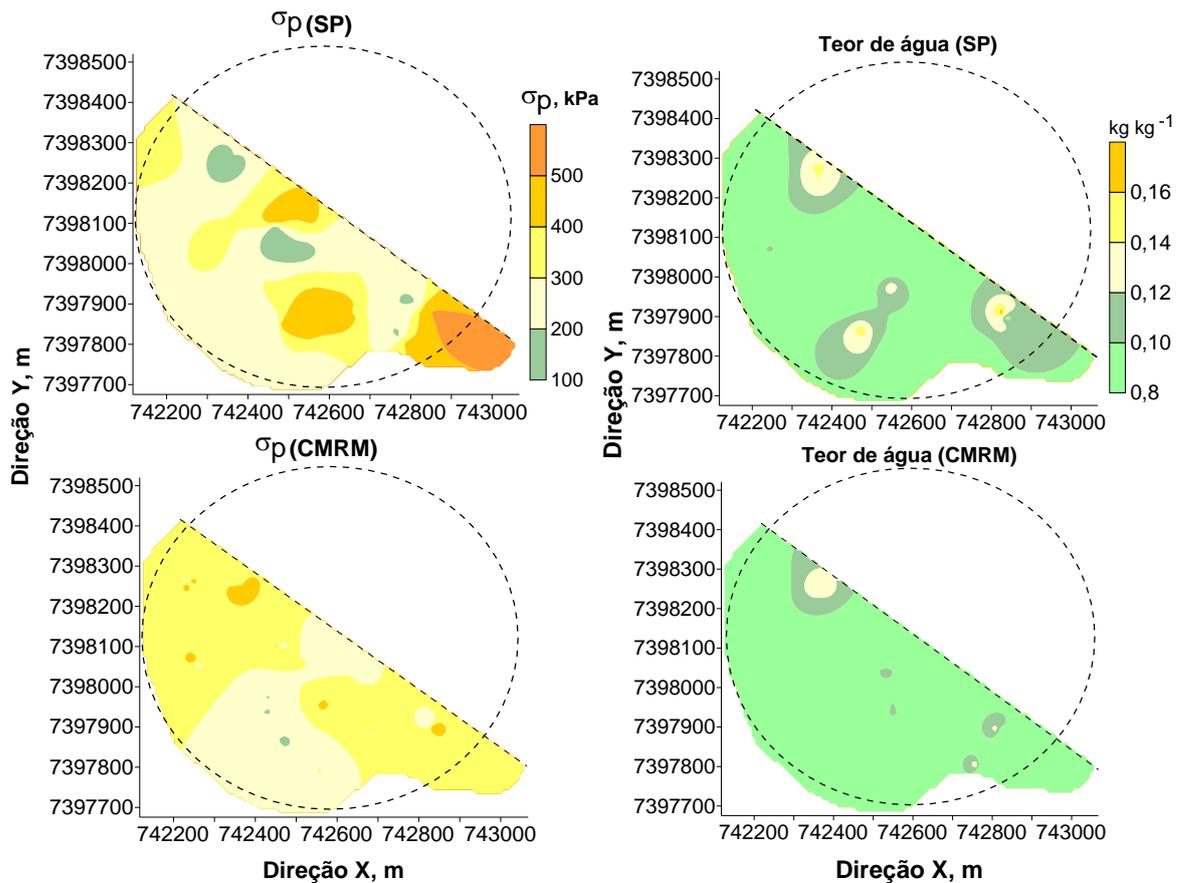


Figura 7. Distribuição espacial dos valores de pressão de preconsolidação (σ_p) e dos valores do teor de água no solo da área do perímetro 1.

Na Figura 7, a distribuição espacial do teor de água no solo além de orientar o produtor quanto ao momento adequado para o tráfego, pode ainda indicar quais as zonas de maior resistência mecânica ou suscetibilidade à compactação. Esta situação é bem ilustrada quando se relaciona os valores de pressão de preconsolidação de algumas regiões da camada SP (Figura 7), com as mesmas regiões do mapa de teor de água no solo. Percebe-se que há uma relação inversa entre estas duas propriedades, como descrita pelos modelos de compressibilidades na Figura 6. De maneira geral, o teor de água praticamente foi invariável entre as duas camadas de solo, predominando o teor médio de aproximadamente $0,10 \text{ kg kg}^{-1}$, com exceção de algumas manchas de $0,12$ e $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$ na camada SP e CMRM, respectivamente. Na época da amostragem de solo (2º semestre de 2003), o solo estava seco, e por se tratar de um solo de textura arenosa com relativa contribuição de silte e baixos teores de matéria orgânica, o armazenamento de água neste solo é muito baixo.

A exemplo da área do perímetro 1, os atributos investigados indicam que a área do perímetro 2 também foi severamente afetada pelo tráfego e pelos sucessivos ciclos de culturas. Na área do perímetro 2, a CMRM foi observada entre 100 e 200 mm, como apresentado na Figura 3. O solo desta área se mostrou mais suscetível à compactação do que o solo do perímetro 1, o que pode ser justificado pelo maior contribuição de argila, menor teor de matéria orgânica, assim como, o menor diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados. Os maiores valores de densidade (D_{si} e $D_{s\sigma_p}$) de ambas as camadas (Figura 8) revelam este fato. Portanto, o tipo e a intensidade do tráfego aplicado nesta área, o teor de água do solo,

assim como o seu estado de consistência merece uma atenção especial por parte do produtor no momento de mecanizá-lo, mesmo se tratando de uma mesma classe de solo.

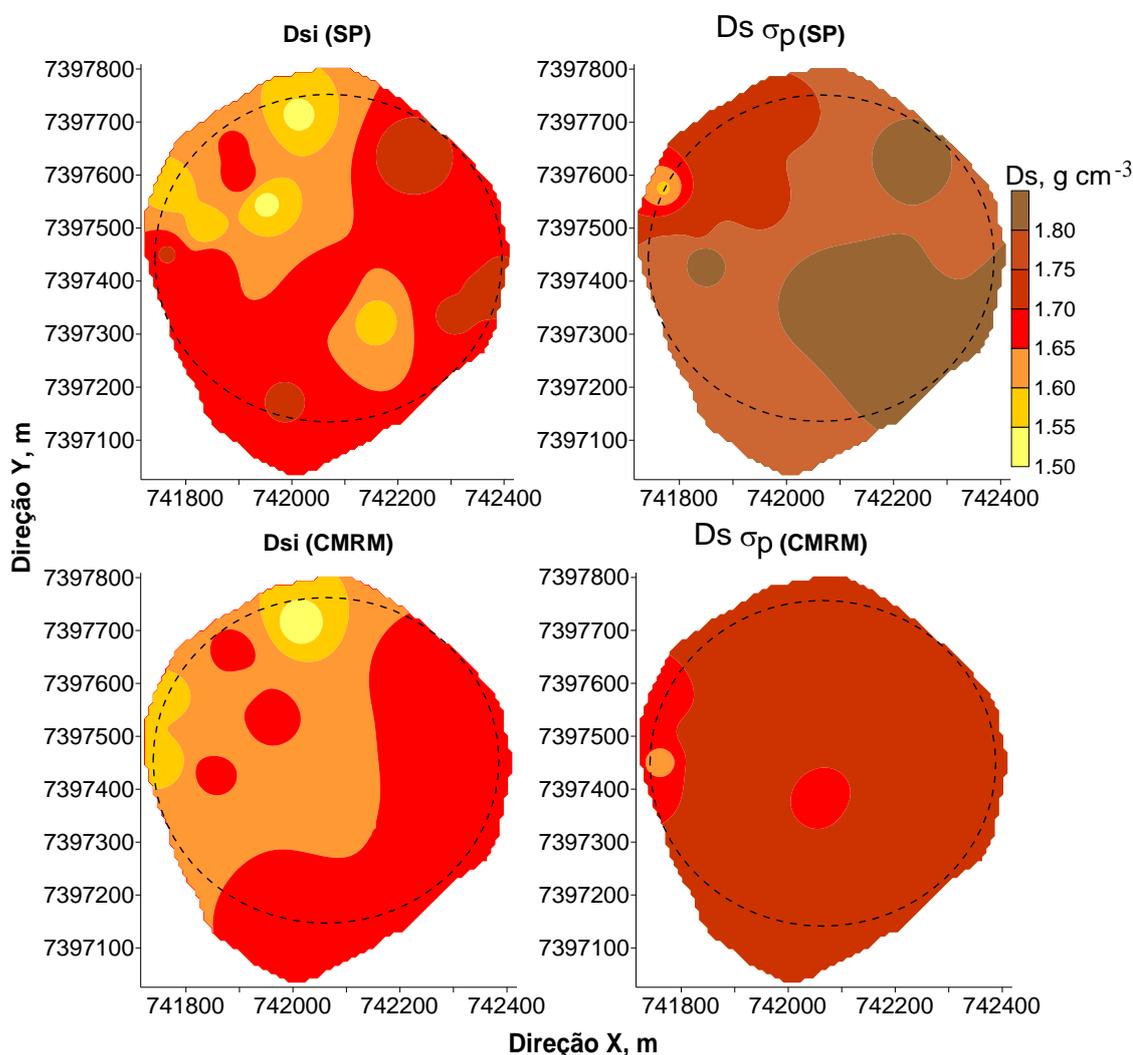


Figura 8. Distribuição espacial dos valores de densidade ($g\ cm^{-3}$) do solo inicial (D_{si}) e referente à pressão de preconsolidação ($D_s \sigma_p$) do perímetro 2.

Observa-se ainda, que tanto pelos maiores valores de densidade (Figura 6), quanto pela porosidade (Figura 9), a camada superficial (SP) está mais consolidada. Valores da ordem de 1,50 a 1,75 $g\ cm^{-3}$ para D_{si} , apesar de se tratar de um solo de textura franco arenosa, são muito elevados. Isto implica em uma baixa aeração, como corroboram os baixos valores de porosidade, que em ambas as camadas predominaram os teores de aproximadamente 35 a 38 % (Figura 9). Solos com essas características na época das chuvas, geralmente ficam encharcados, uma vez que a sua taxa de infiltração (passagem de água no perfil do solo em função do tempo) é muito baixa. Muito provavelmente, isto ocorre porque a contribuição de areia muito fina destes solos é muito alta, e durante as chuvas ou durante os turnos de regas, a movimentação destas partículas promove um preenchimento dos espaços vazios do solo, tornando-o cada vez mais impermeável. Por outro lado, nos veranicos ou a falta excessiva de água, deixam estes solos extremamente coesos (duros), tornando praticamente impossível, um preparo adequado. Em adição, os pequenos incrementos de $P \sigma_p$ (Figura 9 à direita) em relação a P_i , reforça o estado crítico de consolidação do solo da área do perímetro 2.

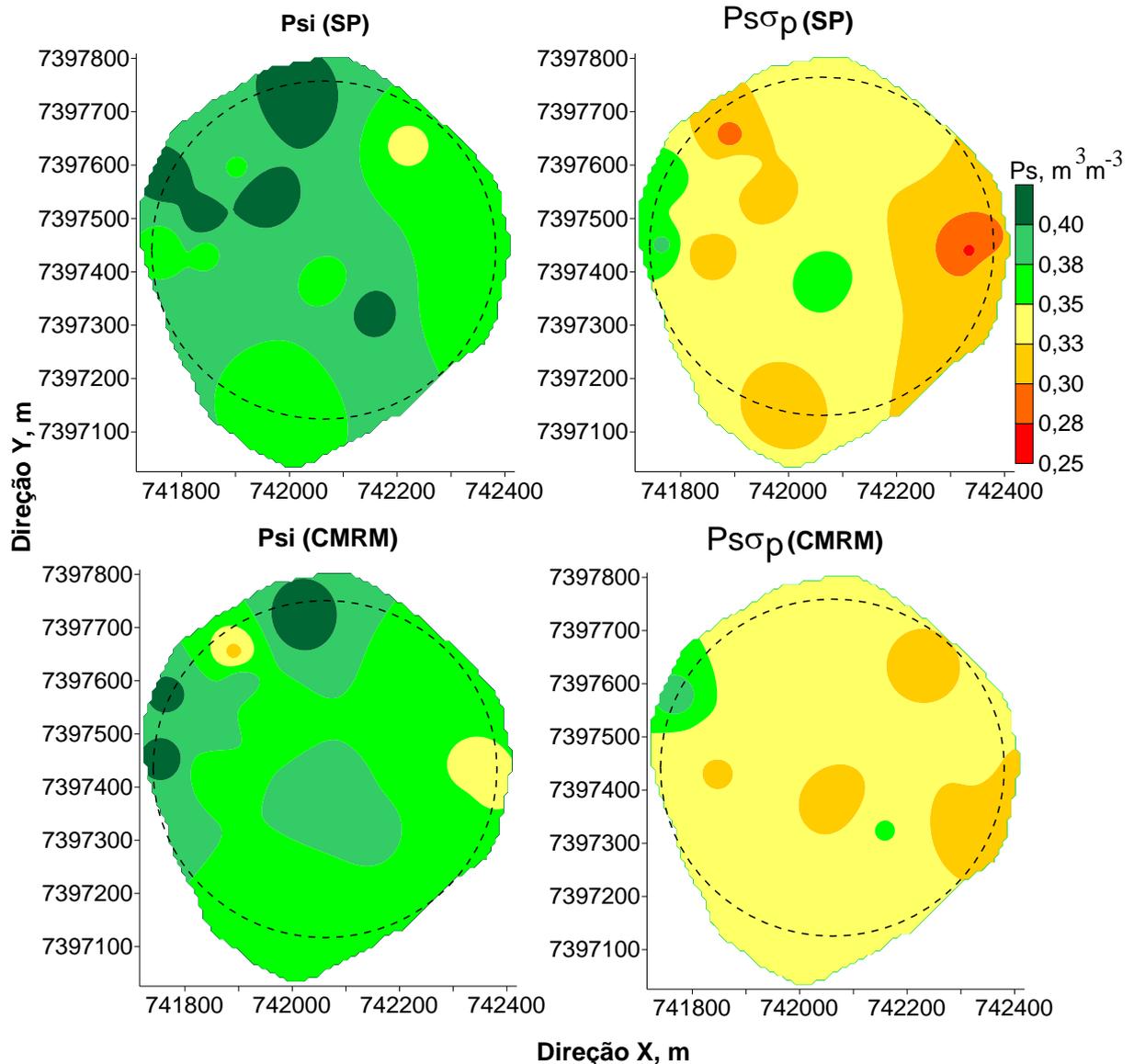


Figura 9. Distribuição espacial dos valores de porosidade do solo inicial (P_i) e referente à pressão de preconsolidação ($P_{\square p}$) do perímetro 2.

Os modelos de capacidade de suporte de carga para a área do perímetro 2 estão apresentados na Figura 10. Para ambas as camadas observa-se uma redução da pressão de preconsolidação ($\square p$) em função do aumento do teor de água no solo. Isto indica, assim como já observado para área do perímetro 1 (Figura 6), um aumento da suscetibilidade destes solos a se compactarem, principalmente se forem trafegados com tratores ou máquinas que apliquem pressões que ultrapassem a resistência interna do solo. Diferente do que ocorreu na área do perímetro 1, na área 2, a camada SP apresentou maior capacidade de suporte de carga do que a CMRM, o que certamente pode está associada a alguma operação de subsolagem logo após a colheita da do feijão e do trigo na segunda quinzena de outubro de 2003, antes do preparo da área para plantar o milho-semente.

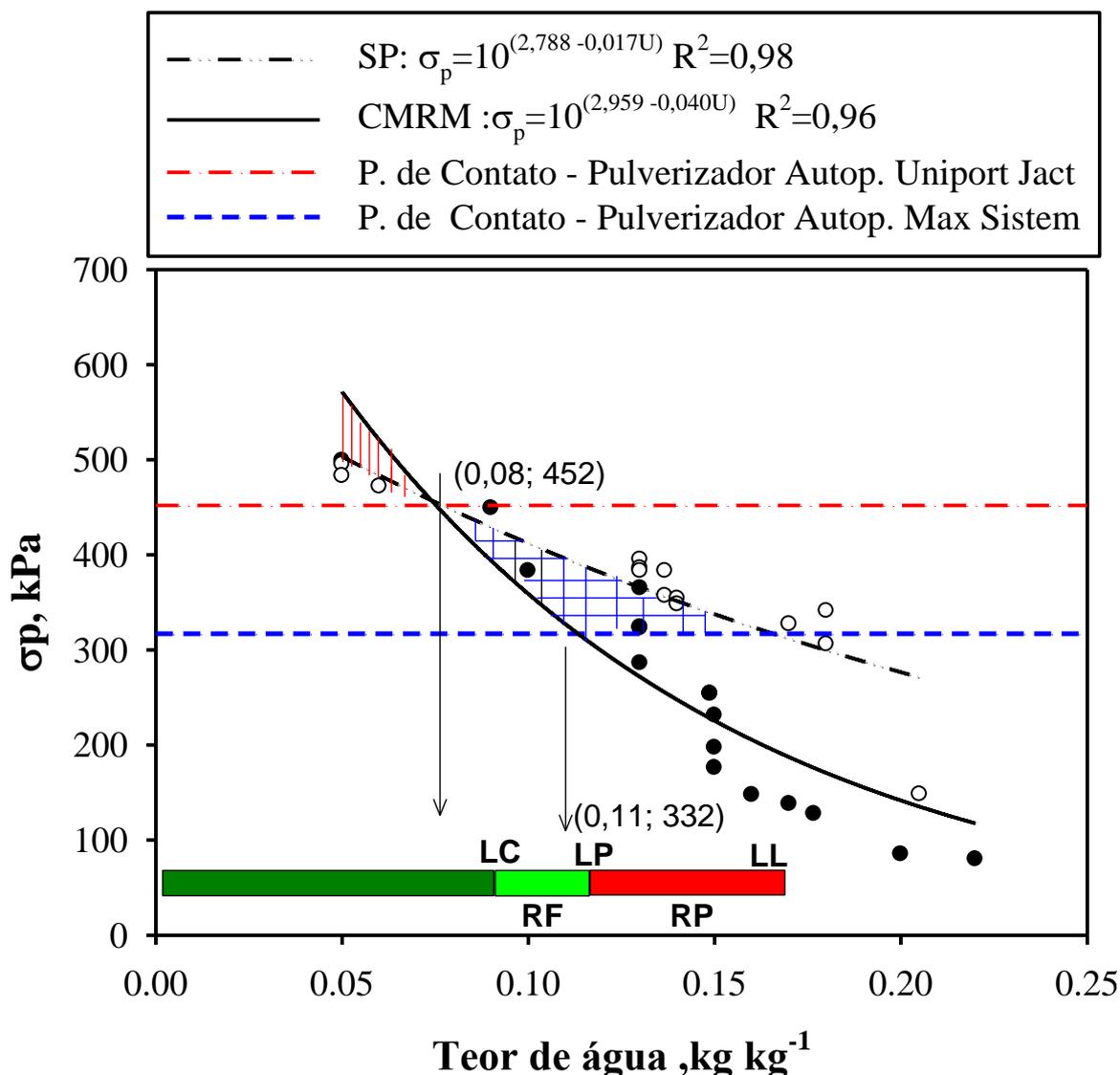


Figura 10. Modelos de capacidade de suporte de carga para duas camadas de solo. Linhas de referência indicam a pressão de contato dos rodados de dois pulverizadores.

Na Figura 10, também estão representadas através das linhas de referências, as pressões de contato que foram aplicadas ao solo por dois dos pulverizadores utilizados por produtores da região. De acordo com a CSCS e o estados de consistência deste solo, ambos pulverizadores só poderiam trafegar a um teor de água de máximo $0,8 \text{ kg kg}^{-1}$, e entre $0,08$ e $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ apenas o pulverizador Autopropelido *Max Sistem Plat*. Todavia os rodados do pulverizador Autopropelido *Uniport Jacto* compactará o solo de ambas as camadas (SP e CMRM), caso ele trafegue o solo a teores de água acima de $0,08 \text{ kg kg}^{-1}$. Isto ocorre porque a pressão que os rodados do pulverizador estão aplicando ao solo é maior do que aquela que ele pode suportar. Se a opção for o pulverizador Autopropelido *Max Sistem Plat*, a estrutura da CMRM será afetada a partir de $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ e a camada SP mesmo apresentando maior CSC do que a que aquela que o pulverizador Autopropelido *Max Sistem Plat* pode aplicar, terá sua estrutura alterada pois o limite superior da região de friabilidade é de aproximadamente $0,12 \text{ kg kg}^{-1}$. Este analogia pode ser feita para todos os demais tratores e máquinas ou conjuntos mecanizados, que o produtor dispunha, e a partir daí, tomar as decisões mais coerentes.

Deve se ressaltar que a elevada CSCS observada nas duas áreas se deve a história de manejo a que estas áreas foram submetidas. A amostragem em ambas as áreas foram feitas depois da colheita do algodão e do milho, de maneira que a história de tensão impressa ao solo foi identificada nos modelos (Figuras 6 e 10). Contudo, a partir do momento que estas áreas forem novamente preparadas (aradas, gradeadas, escarificadas ou subsoladas), as tensões são aliviadas, a resistência mecânica do solo é reduzida e, por conseguinte, a sua capacidade de suporte de carga.

Os mapas de distribuição espacial de σ_p das duas camadas de solo avaliadas na área do perímetro 2 (Figura 11) ratificam o impacto do manejo sobre a estrutura da camada SP ou o provável efeito de uma subsolagem na CMRM, como já constatadas pelas outras propriedades. Nesta camada, quase que em toda a totalidade da área, a σ_p foi de 300 a 400 kPa. Na CMRM os valores de σ_p permitem a visualização de três regiões bem distintas, mas predominam valores da ordem de 100 a 300 kPa.

Continuando a analogia com os pulverizadores e utilizando-se dos mapas, apenas uma pequena região da área da camada SP poderia ser trafegada pelo pulverizador Autopropelido *Uniport Jacto*, sendo neste caso, mais recomendado a utilização do o pulverizador Autopropelido *Max Sistem*, desde que esta decisão seja acompanhada pela distribuição do teor de água do solo, como mostrado na Figura 11 (à direita).

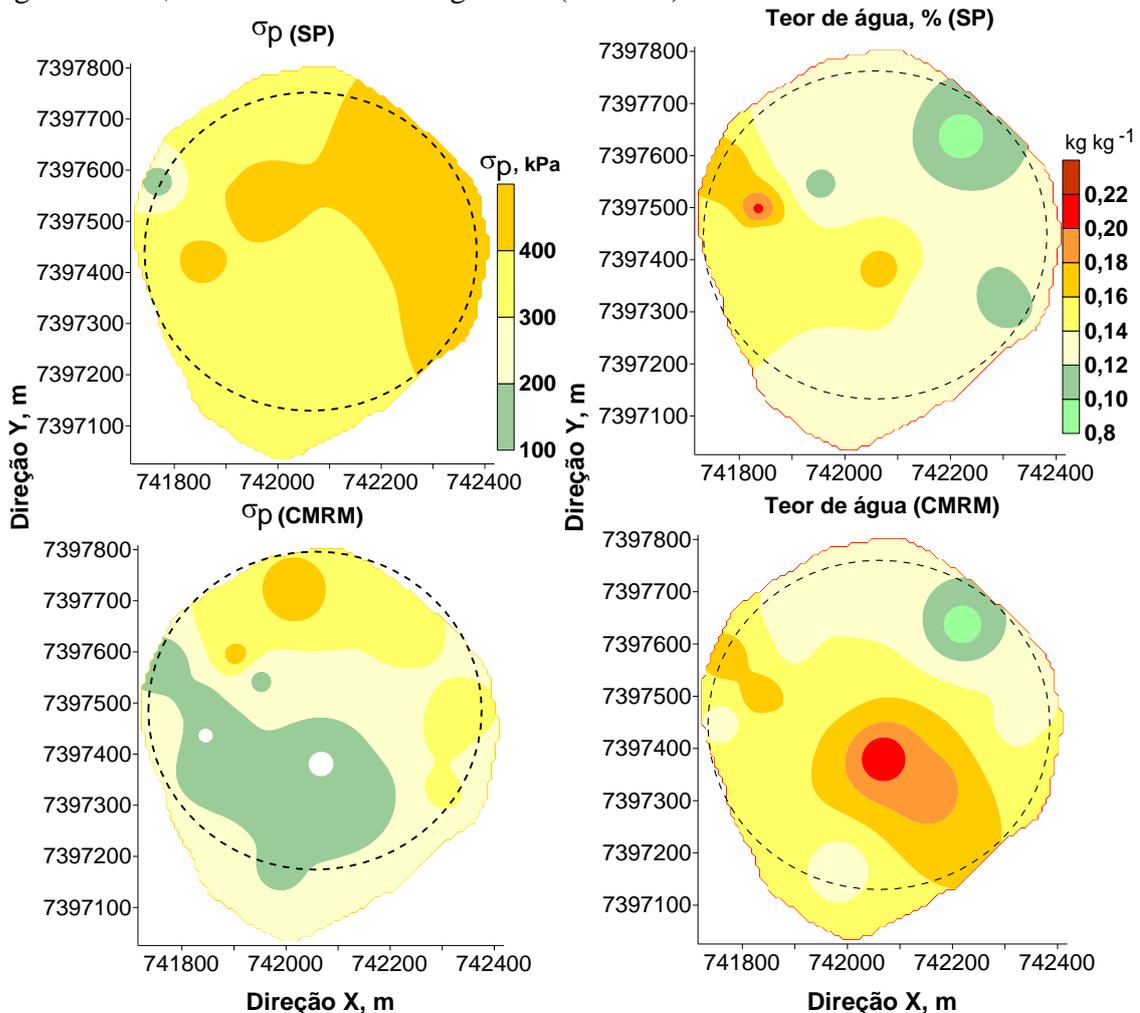


Figura 11. Distribuição espacial dos valores de pressão de preconsolidação (σ_p) e do teor de água da área do perímetro 2.

6 CONCLUSÕES

Os pulverizadores autopropelidos *Uniport Jacto*, seguido pelo *Max Sistem* e pelas colhedoras foram os equipamentos que mais aplicaram pressão ao solo.

As propriedades físicas do solo, especialmente a densidade do solo e a porosidade obtidas das áreas dos dois perímetros, mostraram-se bons indicadores do elevado estado de compactação das duas camadas de solo avaliadas.

Os modelos de capacidade de suporte estimaram satisfatoriamente a pressão de preconsolidação em função da umidade do solo, permitindo que fosse identificada em cada área, a camada de maior resistência mecânica e, conseqüentemente, a mais afetada pelo tráfego e preparo do solo.

Os mapas de pressão de preconsolidação e dos teores de água do solo se mostraram excelentes ferramentas para localizar e visualizar zonas compactadas ou de elevada resistência mecânica. Eles se constituem um importante recurso para avaliar o impacto do tráfego agrícola sobre a estrutura de solos que estão constantemente sob as práticas de irrigação.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOWLES, J. A. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 218p.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. Tesis (Doctorado), Michigan State University, East Lansing, 1994. 114p.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

HALLONBORG, U. Super ellipse as tyre-ground contact area. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v.33, p.125-132, 1996.

LANÇAS, K. P.; Santos, C. A. Penetrômetro Hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA RURAL. **Annales...** La Plata, Sociedad Latinoamericano de Ingenieria Rural, 1998. p.570-576.

MAZZETTO, F.R.; Lanças, K.P. **Determinação da área de contato de pneus agrícolas utilizando uma prensa hidráulica estática**. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, 2000, São José do Rio Preto. **Resumos...** São José do Rio Preto: Universidade Estadual Paulista, 2000. p.260.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas E mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.219-226, 2003b.

SILVA, R. B.et al. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.219-226, 2003a.

SILVA, R.B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2002. 142p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras 2002.

SILVA, R.B. **Sustentabilidade Estrutural do Solo e tráfego de Máquinas**. In: II JORNADA SOBRE AGRICULTURA DE PRECISION, II, A Coruña, **Resumens... A** Coruña: Universaidad de Acoruña, 2004. p.32-38.

SILVA, R.B.; Lanças, K.P; Miranda, E.E.V. Prediction and spatial variability of soil dynamic properties in sugar cane fields of Sao Paulo State - Brazil. In: Stafford, J.V. **Precision Agriculture '05**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2005. p. 441-448.

SOWERS, G. F. Consistency. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analisys physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p.391-399.

TAYLOR, H.M. Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K.et al. (ed). **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1948. p.292-305. (Monograph).