

10

Selamento Superficial em Latossolo Vermelho Distroférrico Tratado com Lodo de Esgoto

José Ronaldo de Macedo; Luiz Fernando Pires; Manoel Dornelas de Souza; Klaus Reichardt e Osny Oliveira Santos Bacchi

Introdução

O encrostamento e/ou selamento superficial do solo é uma modificação física específica na superfície do solo, apresentando uma camada fina com alta densidade e com feições laminares, associada ou não a uma camada de argila dispersa justamente abaixo da superfície (Baver et al., 1973 e Radcliffe et al., 1991). Sombroek (1985), porém, faz uma distinção entre encrostamento superficial e selamento superficial. De acordo com este autor, a crosta superficial é uma capa que pode ter espessura variando de alguns milímetros a alguns centímetros (0,5 a 2,0 cm). É extremamente compacta, dura, quebradiça, formando fendas (ranhuras e rachaduras) no solo e apresentando baixa permeabilidade à água e ao ar, do que o material subjacente. Apresenta estrutura laminar e uma grande porosidade vesicular. Já o selamento superficial é uma capa mais delgada (1 a 5 mm) de espessura, muito densa e dura quando seca, com baixa porosidade e não forma fenda, não deixando de ser, contudo, uma crosta de superfície. As vezes, produz um sistema de fissuras horizontais que provoca descontinuidade entre a crosta e a camada subjacente.

Esse fenômeno tem sido enfatizado na pesquisa micromorfológica. Jongerius (1985) observou três tipos denominados de: selamento superficial (ou diruconcentração), selamento interno (ou saturoconcentração) e selamento interno seguido de microerosão (abruconcentração). Os dois primeiros ocorrem com muita freqüência em terras aráveis e hortícolas que apresentam fraca ou moderada estabilidade em camadas cultivadas.

De acordo com Baver et al. (1973), Pagliai & Vignozzi, (1998), Casanellas et al. (1999), Vieira & Souza (1997) e Rezende (1997), a superfície de selamento é uma formação de crosta devido ao impacto direto das gotas de chuva sobre o solo descoberto, seja após as operações de preparo do solo ou nos estádios iniciais de crescimento da cultura e a subsequente destruição parcial dos agregados da superfície. Esse processo ocorre independentemente da granulometria, tendo maior efeito em solos com altos teores de argila e silte, promovendo, assim, a dispersão do silte e da argila em suspensão, seguida pela lavagem e sedimentação dessas partículas e/ou fragmentos de agregados para dentro dos vazios dos torrões. Nesses solos, o selamento ou crosta superficial, pode, usualmente, exibir uma clara orientação paralela à superfície.

Além da energia de impacto das gotas da chuva na superfície do solo, o efeito hidratante dessas gotas desintegram o agregado, causando sua destruição e a liberação da partículas do solo que a formavam, seguindo-se a dispersão e a orientação das partículas mais finas que infiltram com a água e entopem os poros. No processo de secagem, há formação de uma fina camada endurecida que, quando seca, apresenta-se mais compactada, dura, quebradiça e pouco rugosa. A crosta do solo, assim formada, adquire uma capa superior delgada, com aproximadamente 0,1 mm de espessura e permeabilidade 2000 vezes menor do que a da camada inferior não afetada, ou seja, que não sofreu os efeitos do impacto das gotas. Uma segunda camada surge, logo abaixo da primeira, formada pelas partículas que são arrastadas pela água e que, também, entopem os poros, apresentando então permeabilidade 200 vezes menor do que a da camada inferior não afetada pelo selamento (McIntire, 1958).

Influência dos fatores climáticos

Sabe-se que não somente a quantidade mas, também, a intensidade das chuvas (expressa pela sua energia cinética) atingindo diretamente a superfície descoberta do solo, são os fatores preponderantes na formação do selamento superficial. Roth (1992) relata que tanto a quantidade, como a intensidade das chuvas são elevadas na América do Sul,

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

particularmente em regiões com pronunciada estação definida de distribuição de chuvas.

Dornelas de Souza (1985) descreve que as características da chuva que afetam a infiltração da água no solo, e conseqüentemente o processo de selamento superficial e erosão são o tipo, intensidade, duração e freqüência. O tipo de chuva diz respeito ao momento em que ocorre a intensidade máxima de precipitação (pico). Quando a máxima precipitação ocorre no final da chuva (pico atrasado) o solo encontra-se saturado ou próximo à saturação. Quanto à duração da chuva, quando essas chuvas são de longa duração, o solo atinge a saturação e sua capacidade de infiltração de água é reduzida. A freqüência das chuvas está relacionada com a manutenção do solo saturado ou próximo à saturação por longos períodos de tempo, ou mesmo, provocar a elevação do lençol freático até superfície.

Na natureza, à medida que aumenta a intensidade das chuvas, a distribuição de tamanho de gotas altera-se, elevando a percentagem de gotas de maior diâmetro. A velocidade terminal das gotas também aumenta com o aumento do diâmetro das mesmas, elevando-se, assim, a sua energia de impacto. Com o aumento da energia cinética, em função do aumento da intensidade da chuva, o colapso dos agregados na superfície do solo é maior. O selamento se forma mais rapidamente e tem sua condutividade progressivamente reduzida.

Nesse sentido, Denardin & Freitas (1982) avaliaram a intensidade das chuvas, envolvendo as relações entre duração e período de retorno de 80 cidades no Brasil. De acordo com os resultados, chuvas com intensidades maiores do que 60 mm h^{-1} têm um período de retorno a cada 10,8 anos, porém, podem ser esperados períodos de 5 a 20 para as regiões sudeste e central do Brasil, onde a agricultura é mais intensiva.

Diversos autores (Ellison, 1944; Mannering 1967; Edward & Larson; 1969 e Moldenhouer & Kemper;1969), comparando os efeitos da intensidade, da duração e do número de eventos de chuvas simuladas na formação do encrostamento superficial, em vários solos, verificaram que os solos diferem quanto a suscetibilidade a formação de crosta e que a textura é o fator primordial. Observaram que, dependendo da intensidade da chuva (30

a 70 mm h^{-1}), havia a formação de crosta a partir de 10 minutos de precipitação, chegando a demorar até 90 minutos. Em alguns casos, com apenas uma chuva o processo já ocorria.

A cobertura do solo está diretamente relacionada com o tipo de preparo do solo, e este último, com a rugosidade superficial e selamento superficial (Silva, 1985). Este autor afirma que a cobertura do solo depende intimamente do preparo do solo e manejo de plantas e resíduos.

O grau de mobilização do solo por um determinado conjunto de operações de preparo confere à superfície do solo uma determinada rugosidade. Essa rugosidade influencia a quantidade de água que pode ficar retida nas depressões durante e após um evento de chuva. O aumento da rugosidade, associado a um bom manejo dos restos culturais, protegendo ainda que parcialmente a superfície do solo, pode aumentar bastante o tempo de empoçamento da água da chuva na superfície deste. As pequenas depressões formadas pela rugosidade retêm por mais tempo a água empoçada na superfície, retardando o início do escoamento. A velocidade de escoamento superficial e a energia cinética do escoamento são reduzidas e, em consequência, é menor o poder de arraste e dispersão dos agregados pela enxurrada. Além disso, quanto mais rugoso, menor a taxa de selamento em função do tempo transcorrido (Silva, 1985).

Roth (1992) frisa que devido aos atributos físicos e químicos da maioria dos solos que ocorrem no Brasil e na América do Sul (Oxisolos), esses solos não são propensos ao selamento e encrostamento. Entretanto, as suas distribuições geográficas situam-se nas regiões com maiores intensidades de chuvas, tanto que a relativa estabilidade dos agregados ao selamento, pode ser compensada pela alta energia das chuvas. Portanto, é de se esperar que o selamento venha a ser um problema sério nas regiões onde os solos são mais susceptíveis a ocorrência desse fenômeno.

Ainda segundo Roth (1992), os solos de textura franca arenosa e areia franca, independentemente da sua classificação pedológica, apresentam um alto risco ao selamento. Tais condições são encontradas, principalmente, na região Sudeste do Brasil, mais especificamente no noroeste do Paraná e oeste de São Paulo.

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

De acordo com Baver (1973) antes que as partículas do solo estejam efetivamente cimentadas, elas devem estar próximas entre si. Se essas partículas são de textura argilosa, o sistema apresentará maior área de superfície específica e, portando, apresentará maior probabilidade de realizar grandes números de contatos por unidade de volume do sistema. Estes números de contatos dependerão, também, do tamanho, forma e distribuição e do acondicionamento e ordenamento das partículas. Em um dado material, o acondicionamento é uma variável física que está sujeita a mudanças e manipulação. A água, bem como a natureza e a concentração dos eletrólitos dissociados nela, são particularmente importantes para o ordenamento espacial final das partículas dos solos na condição de encrostamento.

Um requisito essencial à formação da crosta é se ter, inicialmente, uma condição saturada ou próxima da saturação. Como a água é removida pela drenagem e/ou evaporação, a pressão nos poros com água aumenta negativamente. Se a camada superficial consiste de agregados estáveis na água, esta drena rapidamente para os poros maiores entre os agregados e a subsequente evaporação resulta em incremento negativo da pressão dos poros de água dentro dos agregados que, por sua vez, levam as partículas a permanecerem juntas nos agregados. Se, por um lado, a camada da superfície consiste de agregados que mitigam em água, os grandes poros se desintegram sobre o umedecimento e a distribuição do tamanho dos poros é restringida e alterada para uma fração mais fina. O efeito combinado da redução do tamanho dos poros, promovendo uma alta pressão negativa dos poros de água e do aumento do número de pontos de contato contribuem para aumentar a formação de ligações (Baver, 1973 e Uehara & Jones, 1974).

Na fração mais argilosa, a natureza dos cátions absorvidos e a concentração e composição dos eletrólitos nos poros com água afetam o acondicionamento das partículas e o arranjo estrutural do solo. Já os solos sódicos são mais suscetíveis ao encrostamento devido ao fato de suas partículas estarem realmente dispersas, tornando-se compactadas sob o efeito compressivo da pressão negativa dos poros.

O aumento da força iônica da solução do solo comprime a camada difusa, diminuindo, então, as forças repulsivas entre as partículas. Quando essas forças são, finalmente, excedidas pelas forças atrativas inicia-se a floculação das argilas. Tal processo pode ser confirmado quando ocorre a remoção de sais de sódio dos solos salinos, sem um significativo fornecimento de cálcio em substituição ao sódio no complexo de troca; com isso, é comum o aparecimento da crosta.

A ação mecânica da água também influencia a distribuição espacial das partículas de chuva no encrostamento. A ação do impacto das gotas de chuva ou turbulência pode ocasionar elevação (salpicamento) das partículas maiores se concentrarem justamente abaixo da superfície.

A estratificação horizontal é uma das causas comuns do encrostamento do solo. Estresses impostos à superfície do solo durante a secagem, bem como a sua distribuição, em última instância, controlam o número e a distribuição de planos de ruptura na crosta. Se o sistema é heterogêneo e anisotrópico e a água evapora rapidamente, a ponto de gerar um gradiente de estresse, sendo que tendem a se desenvolver planos de falência no ponto onde o gradiente é excessivo. Nos sistemas heterogêneos é normal o surgimento de rachaduras paralelas à superfície, como consequência do encrostamento.

Hsu (1963) demonstrou que ocorrem tensões de estresses concentradas nas interfaces de dois materiais diferindo, grandemente, na elasticidade. Isso sugere que solos não homogêneos que atingem acondicionamentos mecânicos e de floculação química desiguais, influenciam não só o estresse, mas também sua distribuição durante o processo de secagem, que, no final, determinam as características do encrostamento (Uehara & Jones, 1974).

Agentes cimentantes

Os agentes cimentantes do solo são os elementos ou substâncias químicas que agem nos processos de agregação e de endurecimento, reversíveis ou não, das camadas e/ou horizontes (pans) do solo, como os fragipans, duripans,

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

bandas de ferro e podzóis. Eles podem ser caracterizados de diferentes formas e que possibilitam conhecer: 1) em que extensão o agente cimentante é solúvel em água; 2) se as fases sólidas e dissolvidas estão em equilíbrio; 3) se o agente cimentante é cristalino ou não; 4) se a fase sólida seca irreversivelmente ou se re-hidrata e re-dissolve sobre ciclos de umedecimento; 5) se a fase dissolvida existe como íons-pares, ou como moléculas dissolvidas; 6) se a fase dissolvida precipita como partículas dispersas ou como recobrimentos nas superfícies dos minerais e; 7) se o cimento pode adquirir carga na fase sólida.

Os materiais cimentantes amorfos são sólidos, com curta variação de ordem, ou seja, com poucas camadas laminares, e particularmente, efetivos como agentes cimentantes devido a sua habilidade em formar interfaces curvas sólido-ar e, então, produzir ângulos de contatos definitivos com outros sólidos. Diferente dos sólidos cristalinos, os géis amorfos, que no estado inicial da formação da crosta, podem fluir, espalhar ou fundir. Quando o solo está saturado de água, os géis costumam, de fato, se comportar como um líquido viscoso, mas sob desidratação, tornam-se corpos duros e elásticos. Essa capacidade de trocar reversivelmente de um líquido viscoso newtoniano para um sólido-elástico hookiano, em um simples ciclo de secagem promove, em parte, as feições essenciais do encrostamento. Fazendo-se uma analogia com o cimento da construção civil, o agente cimentante deve, em última instância, transformar-se de um líquido viscoso para um sólido elástico (Uehara & Jones, 1974).

Sílica (sílica amorfa)

Apresenta alta solubilidade na água, variando de mais de 300 mg kg⁻¹ de SiO₂, em solos fortemente alcalinos, a menos de 1 mg kg⁻¹ nos latossolos, sendo sua natureza particularmente importante para definir o grau de solubilidade em que se encontra. Quando ocorre como corpo de sílica opaca, tipo Fitólitos, comporta-se de forma semelhante a outras partículas rígidas, mas, se ocorrer como gel viscoso, capaz de fluir e coalescer sob estresse compressivo da pressão de água nos poros, torna-se um efetivo agente cimentante.

Nas terras das regiões áridas e semiáridas sob irrigação, a sílica é, provavelmente, o maior agente cimentante, enquanto nos trópicos úmidos, os cristais de silicato de alumínio e de sesquióxidos são as causas prováveis de endurecimento e de encrostamento. Crostas irreversíveis nas lateritas parecem estar associadas com a inabilidade dos géis dos sesquióxidos em reabsorver água, após desidratadas. Sílica gel pode reabsorver água, mesmo quando seca (Uehara & Jones, 1974).

Sesquióxidos amorfos e silicato de Alumínio

Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio são extremamente insolúveis na faixa de pH encontrado no solo. Os estudos que explicam a química de superfície dos óxidos fundamentam-se no Ponto de Carga Zero (PCZ), que para os óxidos corresponde ao pH entre 8,0 e 9,1 e na carga dependente de pH. Abaixo do PCZ os óxidos e hidróxidos possuem carga negativa. As evidências dos dados sugerem que os óxidos de ferro não atuam como agentes cimentantes no solo enquanto não formarem uma matriz contínua, ou seja, não exercem ação cimentante quando ocorrem como corpos discretos (Greenland et al., 1968 e Jones & Uehara, 1973). Esses autores revelam que, diferente dos óxidos de ferro, os silicatos amorfos de alumínio formam um revestimento contínuo sobre todas as partículas. É evidente que os sesquióxidos amorfos e os alumínio silicatados atuam como camadas de recobrimento. Embora essas partículas recobertas possam ser dispersas por sonificação, elas, contudo, refloculam imediatamente quando a energia sônica é removida, indicando a existência de uma rede de forças atrativas entre as partículas. A dissolução do recobrimento por fervura em álcalis (Na_2CO_3 ou NaOH) causa dispersão. O endurecimento e a permanência da crosta de laterita, provavelmente, deve-se aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio que ocorrem como uma matriz contínua. Essas feições de sesquióxidos têm levado a crer que o óxido de ferro livre é um importante agente cimentante em todos os solos.

As novas evidências sugerem, agora, que a efetiva ligação entre partículas ocorre quando um agente cimentante forma uma matriz contínua

através do sistema. Essas ligações se dão entre o cimento e as partículas recobertas.

Matéria orgânica

A agregação é um processo pelo qual partículas primárias se ligam conjuntamente, dentro de compostos unitários de tamanhos variados e o encrostamento é uma forma de agregação. O estado inicial da mistura do material orgânico, antes do secamento, tem influência decisiva nas condições superficiais do solo em seguida ao secamento (Cegarra, 1983).

De acordo com Novotny & Martin-Neto (1999), determinadas substâncias desenvolvem cargas elétricas na superfície, quando em contato com um meio polar. Os possíveis mecanismos de geração dessas cargas podem ser a ionização (no caso das substâncias húmicas) e a adsorção ou dissociação de íons. A ionização, no caso das substâncias húmicas, é o mecanismo mais importante, devido à existência de grupamentos carboxílicos e fenólicos em sua estrutura.

A estabilidade da dispersão baseia-se no fato de que há um balanço entre a repulsão das cargas da dupla camada elétrica entre partículas coloidais e a interação atrativa das forças de van der Waals entre essas partículas. Os processos de floculação e coagulação dependem da espessura da dupla camada elétrica (ou difusa) e da força do meio. Em camadas finas e em função das elevadas forças iônicas, surge um segundo mínimo de energia potencial que estabiliza os agregados, floculando as partículas coloidais; porém o processo é reversível, pois redispersa por agitação. Quando as partículas se aproximam o suficiente, até o mínimo primário, ocorre a coagulação das partículas em um processo de agregação irreversível.

Em relação ao efeito agregante das substâncias húmicas, Novotny & Martin-Neto (1999) descrevem que estas são substâncias anfotéricas, ou seja, suas moléculas contêm tanto grupos polares como os carboxílicos e os fenólicos, quanto grupos apolares, como a maioria dos grupos alifáticos e aromáticos não substituídos. Essa composição confere às substâncias húmicas,

o caráter tenso-ativo, podendo formar monocamadas orientadas com os grupos polares voltados para um sentido e os apolares para o outro.

As substâncias húmicas podem se ligar à fração mineral do solo por meio de cátions polivalentes (Canellas et al., 1999). Os grupos ácidos reativos distribuem-se por toda a macromolécula e, dessa forma, a ligação com cátions polivalentes pode ocorrer com diferentes partículas de argila, simultaneamente. Como resultado, aumenta-se a agregação das partículas do solo. Essa adsorção não somente une as partículas de argila, mas também orienta a porção hidrofóbica das substâncias húmicas para o lado externo do agregado, reduzindo a infiltração de água e aumentando a estabilidade do solo (Piccolo & Mbagwu, 1994).

Efeitos deletérios do selamento superficial

Sob condições de: tipo; granulometria; teores de matéria orgânica do solo; clima; cultura e manejo, diversos autores relatam que os problemas agrônômicos de encrostamento ou selamento superficial são muito antigos, e que em todos os trabalhos há predomínio dos efeitos deletérios nas propriedades físicas do solo (Jongerius, 1983; Pagliai et al., 1983; Kooistra & Siderus, 1985; Sombroek, 1985; Pla, 1985; Roth 1992 e Pagliai & Vignozzi, 1998).

Tais efeitos referem-se: 1) a perda de água da chuva, em termos de água do solo devido à redução da permeabilidade de água e ao escoamento superficial; com isso, o tempo de empoçamento da água na superfície é reduzido provocando aumento do volume de enxurrada, o que favorece a erosão do solo, tanto laminar como por sulco em pendentes com diversas declividades; 2) ao impedimento mecânico à germinação de sementes e à emergência das plântulas; 3) a falta de aeração e troca gasosa, justamente abaixo da superfície de encrostamento, retardando o desenvolvimento das raízes; 4) às injúrias provocadas às plantas devido ao empoçamento; 5) a força excessiva necessária para as operações de cultivo; e 6) a necessidade de repetição dos mesmos. A relação entre os macroporos e a microporosidade é alterada com predominância da microporosidade.

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

Sombroek (1985) cita, porém, alguns casos em que o encrostamento pode ser positivo, tais como: proteção contra a erosão eólica, as vezes hídricas; distribuição mais econômica da água de irrigação e armazenamento de água nos países do oeste da África.

Pagliai et al. (1983) e Pagliai & Vignozzi (1998) afirmam que o encrostamento do solo pode ser reduzido ou prevenido pela utilização de rejeitos orgânicos tratados das cidades, entre eles, o lodo de esgoto. Essa ação é devida a adição de matéria orgânica que melhora as propriedades físicas, como estabilidade de agregados e porosidade do solo reduzindo o efeito do impacto direto da gota d'água da chuva na superfície do solo, pela presença de fragmentos da matéria orgânica. Segundo os autores, a matéria orgânica ajudaria a quebrar o encrostamento superficial, com redução da compactação e melhoria das taxas de absorção de água.

As características físicas das crostas ou selamento superficiais podem ser estabelecidas por meio de estudos de microscopia óptica em lâminas delgadas, pelo estudo de microscopia eletrônica de varredura e por meio de ensaios de módulo de ruptura, já que com um valor de 27 kPa, a maioria das plantas não chega a emergir e, com módulos de ruptura inferiores a 10 kPa, não haverá problemas de emergência (Casanellas et al., 1999a),

Pla (1998) enfatiza que a análise da gênese do selamento e/ou encrostamento superficial é fundamental para a compreensão de um dos processos de erosão do solo. O escoamento superficial induzido pelo selamento e/ou encrostamento superficial não somente ressalta esse problema, mas também, refere-se à perda de água para o estoque de água disponível às plantas na zona das raízes, causando períodos de déficit hídrico, dependendo do solo, da profundidade das raízes e do regime de chuvas podendo resultar em decréscimos de produção.

Roth (1992) conclui que o selamento e/ou encrostamento superficial tem sido reconhecido como um problema sério. No Brasil, as regiões agrícolas com esses problemas são as mais mecanizadas e estão localizadas em áreas com altas intensidades de precipitação. Nessas

condições, solos com maiores resistências ao selamento, facilmente formarão selos devido a intensidade das chuvas. Oxisols argilosos, com altos conteúdos de matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio, requerem altas energias da chuva para que ocorra o selamento. Por outro lado, solos com texturas mais arenosas nos horizontes superficiais, principalmente os Ultisols, com baixa estabilidade dos agregados devido ao baixo conteúdo de argila e às reduzidas quantidades de matéria orgânica são, geralmente, os solos mais sujeitos ao selamento. No Estado de São Paulo, em concordância com a afirmativa de Roth (1992), o selamento superficial tem sido verificado logo após o preparo do solo num experimento instalado em Latossolo Vermelho distroférico no município de Jaguariúna. Este fato pode estar associado ao sistema de preparo do solo com aração e gradagem, seguida da passada da enxada rotativa para incorporação do lodo de esgoto, deixando o solo sem proteção contra os efeitos prejudiciais da chuva, já que, de acordo com Baver (1973), Morin & Beneamini (1977), Agassi et al. (1981), Rezende (1997) e Vieira & Souza (1997), o selamento superficial é devido aos processos de desagregação do solo pelo impacto direto das gotas das chuvas, causando o salpicamento das partículas e posterior entupimentos dos poros superficiais.

Silva & Kato (1997), trabalhando em solos do Cerrado brasileiro sob ação de dois tipos de manejo, o tradicional (duas arações e uma gradagem) e a semeadura direta, os quais foram submetidos a cinco períodos de chuva simulada (0; 2; 5; 10 e 20 minutos) com energia cinética média de $29 \text{ t.m ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, observaram que a resistência aos agregados do solo à energia cinética e, conseqüentemente a dificuldade à formação do selamento superficial foi maior nos solos sob vegetação de Cerrado nativa do que nas áreas cultivadas. Foi observado, ainda, que a condutividade hidráulica do solo saturado, sob a ação da energia cinética das gotas da chuva, apresentou dois estágios. O primeiro caracterizado por uma forte diminuição na condutividade hidráulica e o segundo estágio, por uma lenta diminuição deste atributo.

Material e Métodos

Densidade do solo

Coletaram-se três amostras por parcela na camada superficial do solo (profundidade de 0 a 5 cm), após o quarto plantio do milho e nove amostras de solo sob mata natural. A determinação da densidade do solo na área do selamento superficial foi feita por tomografia computadorizada e via transmissão de raios gama. Das cento e oito amostras indeformadas que foram coletadas na camada superficial, 12 foram analisadas por meio da Tomografia Computadorizada (Fig. 1) e 96 só por meio da transmissão de raios gama.

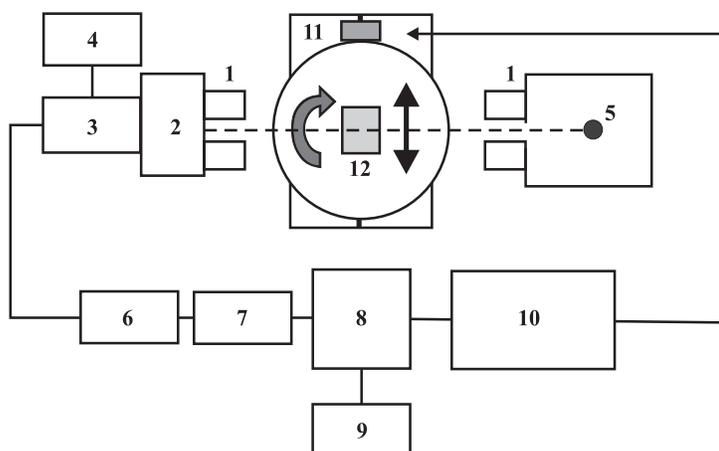


Fig. 1. Diagrama esquemático do tomógrafo de primeira geração. (1) colimadores; (2) NaI(Tl) detector; (3) tubo fotomultiplicador; (4) unidade de alta tensão; (5) fonte de ^{137}Cs ; (6) amplificador; (7) analisador monocanal; (8) contador; (9) temporizador; (10) microcomputador; (11) motor de passada e (12) amostra de solo.

As imagens foram obtidas por meio de tomógrafo de primeira geração, com arranjo fonte-detector fixo e movimentos translacional e rotacional da amostra. A fonte radioativa utilizada foi a do Césio 137 (Cs^{137}), com uma atividade de 74×10^8 Bq e detector de cintilação sólida de iodeto de sódio (NaI(Tl)) de $3'' \times 3''$, acoplado a um tubo fotomultiplicador. Colimadores de chumbo de 1×10^{-3} m foram colocados na saída da fonte e na entrada do detector

para evitar a contabilização de radiações espalhadas. A aquisição de dados e os movimentos de rotação e translação da amostra foram controlados por meio de interfaces acoplados a um programa de computador (PC-Windows). Os procedimentos estão descritos com maiores detalhes em Pires et al. (2002).

A calibração do tomógrafo foi feita por meio da correlação entre os coeficientes lineares (μ) de diferentes materiais, pelo método de transmissão de raios gama e as respectivas unidades tomográficas (UT) (Naime, 2001; Cássaro, 1994). As imagens tomográficas das amostras de solo foram adquiridas de planos verticais cortando o centro das amostras. Os valores de UT das amostras foram então convertidos para valores de densidade do solo (ρ_s) e a partir daí, foram construídos os perfis de densidade do solo, utilizando-se a equação 1.

$$\rho_s = \frac{UT}{\alpha(\mu_s^* + \mu_w^* \cdot \theta)} \quad (1)$$

Em que: μ_s e μ_w são os coeficientes de massa do solo e da água; α é o coeficiente de correlação entre os coeficientes de atenuação linear e as UT e θ é o conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

O método de transmissão de raios gama foi utilizado para investigar a variação média da densidade do solo, em três diferentes profundidades (0,3; 0,5 e 1,2 cm) da superfície do solo. Colimadores circulares, com diâmetros de 1,0 mm, foram acoplados em ambas as fontes e o detector e o posicionamento das amostras foi mantido os mesmos a fim de permitir que o feixe de raios gama atravessasse a linha central das amostras. Para o método de transmissão de raios gama, a densidade do solo foi calculada segundo a equação (2), considerando o seu conteúdo de água volumétrico (θ):

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) = I_0 \cdot \exp(-\mu^* \cdot \rho \cdot x) \quad (2)$$

Em que: I_0 e I são as taxas de feixe de fótons incidente e emergente, respectivamente; μ (cm^{-1}) é o coeficiente de atenuação linear que mede os fótons adsorvidos ou retro espalhados por unidade de comprimento enquanto interagem com a amostra; $\mu^* = \mu/\rho$ ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) é o coeficiente de atenuação de massa e ρ (g cm^{-3}) é a densidade do material atravessado.

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

A calibração do tomógrafo foi realizada utilizando materiais de diferentes coeficientes de atenuação linear. As unidades tomográficas e os respectivos coeficientes de atenuação estão explícitos nas Figuras 2 e 3. Os valores dos coeficientes de atenuação linear obtidos dos diferentes materiais utilizados para calibração, bem como os valores dos coeficientes de atenuação de massa do solo ($\mu_s^* = 0.00836 \text{ m}^2 \cdot \text{Kg}^{-1}$) e água ($\mu_w^* = 0.00850 \text{ m}^2 \cdot \text{Kg}^{-1}$) estão em concordância com os encontrados na literatura pertinente (Fante Junior et al., 2000; Ferraz & Mansell, 1979).

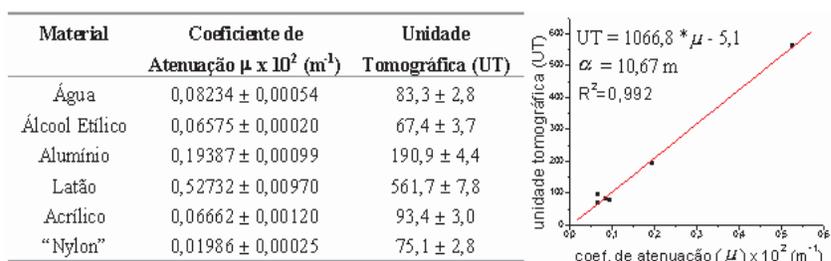


Fig. 2. Calibração do Tomógrafo Computadorizado para fótons gama (^{137}Cs). Valores médios dos coeficientes de atenuação linear (μ) e das unidades tomográficas (UT) das amostras utilizadas para calibrar o tomógrafo de raios gama.

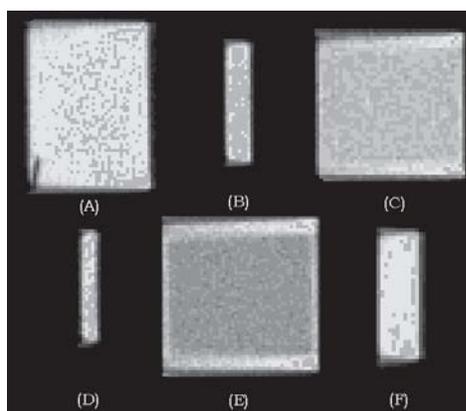


Fig. 3. Imagens tomográficas dos materiais utilizados na calibração do tomógrafo: (A) alumínio; (B) acrílico; (C) água; (D) nylon; (E) álcool e (F) latão.

Resultados e Discussão

Analisando as Figuras 4 e 5, pode-se observar que, a medida em que há um incremento da dose de lodo, a densidade do solo na superfície das amostras aumenta, assumindo valores maiores do que aqueles obtidos em profundidade, principalmente, para os tratamentos 2N, 4N e 8N. O método de transmissão de raios gama permitiu observar que a densidade do solo na superfície do mesmo é significativamente maior do que os valores obtidos nas outras duas profundidades. Este fato sugere, conforme se observa na Figura 4, que o incremento do selamento superficial seja uma ação combinada do preparo do solo, com aração e gradagem, seguido da passagem da enxada rotativa e do resíduo aplicado.

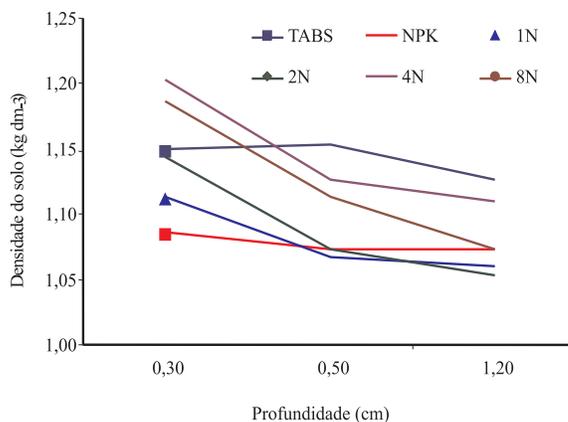


Fig. 4. Análise das densidades do solo, por meio de transmissão de raios gama, para três profundidades (0.3, 0.5 e 1.2 cm), com diferentes tratamentos de lodo de esgoto (TABS- testemunha absoluta, NPK- adubação mineral, 1N- dose de lodo com N igual a NPK, 2N- dose de lodo com N duas vezes maior que NPK, 4N- dose de N quatro vezes maior que NPK e 8N- dose de lodo igual a oito vezes o N de NPK). Média geral incluindo os lodos de Franca e Barueri

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

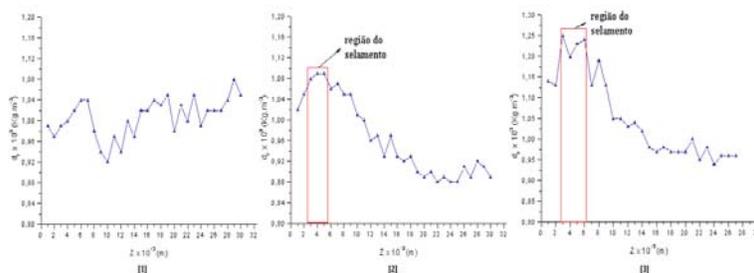


Fig. 5. Gráfico do perfil de densidade para [1] amostra testemunha absoluta, [2] e [3] amostras com níveis distintos de lodo (4N e 8N respectivamente). Média dos lodos de Franca e Barueri.

Além disso, os resultados indicaram que a adição de lodo pode estar influenciando no incremento do selamento superficial, principalmente, nas doses de 4N e 8N. Algumas hipóteses podem ser levantadas para explicar tal efeito. O efeito cimentante da matéria orgânica (Canellas et al., 1999 e Novotny & Martin-Neto, 1999), associado aos efeitos de repelência dos compostos orgânicos de alto peso molecular, do tipo ceras, óleos e outros (Marciano, 1999); o uso de polímeros durante o processo de tratamento do lodo de esgoto nas ETEs de Barueri e Franca (Tsutiya, 2001) e os altos conteúdos de sílica, ferro e alumínio em extrato de saturação, que são, sabidamente, agentes cimentantes do solo (Karanthanas, 1987; Thompson et al. 1996; Boulet et al., 1998).

Analisando a Tabela 1, pode ser verificado que os cilindros C1 e C2 apresentam densidades médias de selamento superficial, significativamente maiores, na camada com selamento superficial (ρ_{ss}) do que em relação à densidade do solo em toda a amostra (ρ_s), exceto para aquelas amostras relativas aos tratamentos testemunha absoluta e controle NPK, que não receberam aplicações de lodo de esgoto e para as quais os valores ρ_{ss} e ρ_s foram similares.

Tabela 1. Valores médios da densidade do solo apresentando selamento (r_s) e densidade do solo (r_s) para dois cilindros (C1 e C2) das amostras de solos com doses crescentes de lodo de esgoto de Franca e Barueri.

Tratamento	$\bar{\rho}_{ss} \times 10^3$	$\bar{\rho}_s \times 10^3$	kg dm^{-3}	$\bar{\rho}_{ss} \times 10^3$	$\bar{\rho}_s \times 10^3$
	C1	C1		C2	C2
<i>Tabs</i>	1,00 ± 0,02	1,01 ± 0,04		1,16 ± 0,04	1,14 ± 0,10
<i>NPK</i>	0,99 ± 0,02	1,01 ± 0,07		1,06 ± 0,01	1,01 ± 0,06
<i>1N</i>	1,08 ± 0,02	0,96 ± 0,07		1,14 ± 0,02	1,03 ± 0,10
<i>2N</i>	1,06 ± 0,01	1,00 ± 0,12		1,16 ± 0,02	0,97 ± 0,11
<i>4N</i>	1,01 ± 0,01	0,92 ± 0,06		1,18 ± 0,06	0,94 ± 0,10
<i>8N</i>	1,23 ± 0,02	1,05 ± 0,10		1,04 ± 0,03	0,94 ± 0,09

* TABS- testemunha absoluta, NPK - adubação mineral, 1N- dose de lodo com N igual a NPK, 2N - dose de lodo com N duas vezes maior que NPK, 4N - dose de N quatro vezes maior que NPK e 8N - dose de lodo igual a oito vezes o N de NPK. médias de 2 amostras por tratamento.

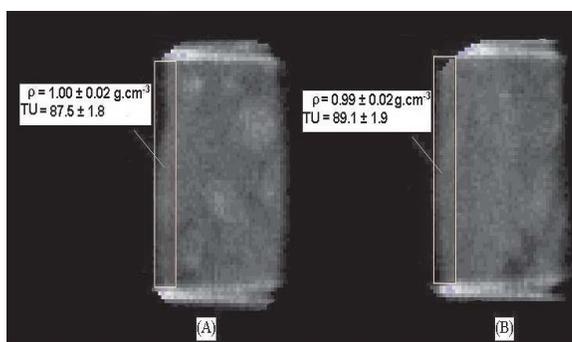


Fig. 6. Imagens tomográficas apresentando valores médios de UT e na região de selamento superficial (cilindros C1): amostras testemunha absoluta (A) e controle NPK (B).



Fig. 7. Imagens tomográficas apresentando valores médios de UT e na região de selamento superficial (cilindros C1): amostras 1N (A) e 2N (B). (1N- dose de lodo com N igual a NPK, 2N- dose de lodo com N duas vezes maior que NPK)

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

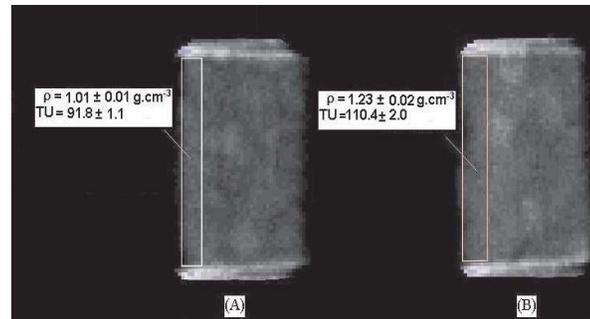


Fig. 8. Imagens tomográficas apresentando valores médios de UT e na região de selamento superficial (cilindros C1): amostras 4N (A) e 8N (B). (4N- dose de N quatro vezes maior que NPK e 8N- dose de lodo com N igual a oito vezes o N de NPK).

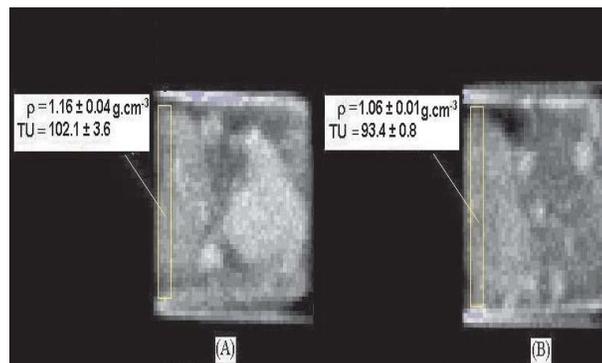


Fig. 9. Imagens tomográficas apresentando valores médios de UT e na região de selamento superficial (cilindros C2): amostras testemunha absoluta (A) e controle NPK (B).

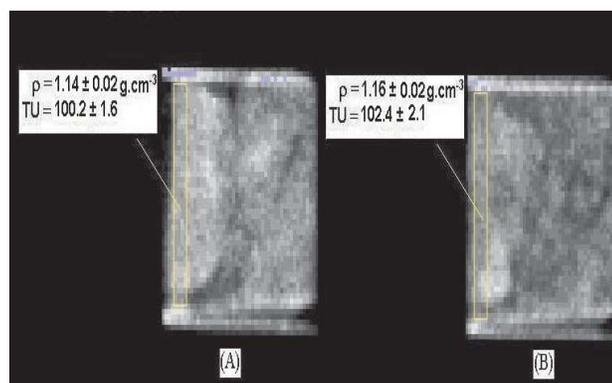


Fig.10. Imagens tomográficas apresentando valores médios de UT e na região de selamento superficial (cilindros C2): amostras 1N (A) e 2N (B). (1N- dose de lodo com N igual a NPK, 2N- dose de lodo com N duas vezes maior que NPK).

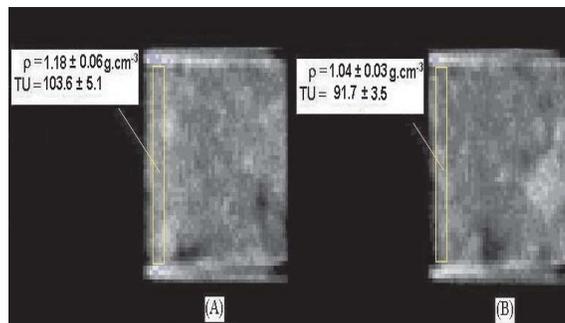


Fig. 11. Imagens tomográficas apresentando valores médios de UT e na região de selamento superficial (cilindros C2): amostras 4N (A) e 8N (B). (4N- dose de N quatro vezes maior que NPK e 8N- dose de lodo com N igual a oito vezes o N de NPK).

As imagens tomográficas das Figuras 6 e 9 mostram os valores de densidade média ($\bar{\rho}$) e das unidades tomográficas (UT) para os tratamentos testemunha absoluta e NPK, nas regiões onde, possivelmente, está ocorrendo o processo de selamento superficial. Os valores médios das densidades de solo dessas amostras para as possíveis regiões de selamento, quando comparadas com a densidade média de toda a amostra indicam a ausência do selamento nesses tratamentos.

As Figuras 7, 8, 10 e 11 representam amostras que receberam lodo de esgoto como fertilizante nas taxas de 1N, 2N, 4N e 8N a dose recomendada. Pelas análises das densidades dos perfis, é possível observar valores de r significativamente maiores na camada superficial, quando comparados com os valores médios de densidade do solo de toda a amostra. Os resultados obtidos para a r_{ss} (Figuras 7, 8, 10 e 11) e r_s , confirmam a existência de selamento na região superficial do solo.

Finalmente, por meio da análise da imagem tomográfica foi possível estimar a espessura do encrostamento superficial do solo, que variou entre 2 mm a 4 mm.

Efeito do selamento na emergência de plântulas

A Figura 12 mostra o número de plântulas que emergiram durante os anos agrícolas de 2000/2001 e 2001/2002. Nela, são visualizados os efeitos

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

provocados pelo sistema de preparo do solo, associados às altas precipitações. Verifica-se que no plantio referente ao período de 2000/2001, o número de plântulas emergidas por tratamento não diferiu estatisticamente, ficando em torno de sete por metro linear. Analisando os dados diários das precipitações ocorridas no período (Tabela 2), nota-se a ocorrência de chuva de $42,24 \text{ mmdia}^{-1}$, seis dias antes do plantio, que foi efetuado em 31/10/2001. Dois dias após o plantio houve chuva de $11,82 \text{ mmdia}^{-1}$, só voltando a chover entre os dias 12 e 14 ($41,23 \text{ mm}$) e 17 e 18/11/2001 ($142,34 \text{ mm}$).

Apesar das grandes quantidades de chuvas verificadas nos meses de outubro ($122,6 \text{ mm}$) e novembro ($245,5 \text{ mm}$), a formação do encrostamento superficial só ocorreu após a emergência das plântulas, não afetando, assim, o estande final nas parcelas experimentais.

No ano agrícola de 2001/2002, foram realizados dois plantios devido a baixa emergência das plântulas (Fig. 12). O primeiro plantio foi realizado no dia 19/10/2001, dois dias após precipitações de $12,5 \text{ mmdia}^{-1}$ e de $5,0 \text{ mmdia}^{-1}$ (dias 16 e 17/10, respectivamente). Quatro dias após o plantio (dias 21 e 23/10) ocorreram precipitações da ordem de 22 mm e $36,75 \text{ mmdia}^{-1}$, respectivamente e, como resultado, observou-se a formação da crosta superficial no solo, antes da emergência das plântulas. A consequência foi uma redução significativa do número de plantas por metro linear que variou entre 3,09 a 4,62 (Fig. 12), Um fato interessante a ser ressaltado é que a maior taxa de emergência ocorreu nas parcelas com as maiores doses de lodo, principalmente nas referentes aos tratamentos 8N. Isto pode ser justificado pelo efeito de rachaduras ocorridas na superfície do solo, gerando pontos de fraqueza por onde as plântulas emergiram.

O replantio foi efetuado em 01/11/2001, sendo que no dia 04/11 choveu $10,5 \text{ mm}$, só voltando a chover maiores quantidades, nos dias 13 ($29,75 \text{ mmdia}^{-1}$); 14 (13 mmdia^{-1}) e 15/11 (35 mmdia^{-1}), provocando o aparecimento do selamento superficial, porém as plântulas já tinham emergido. Neste caso, a taxa de emergência variou entre 4,71 e 5,53 (Fig. 12). O aumento da taxa de emergência das plântulas apresentou diferenças estatisticamente significativas entre o primeiro plantio de 2001 e o segundo, principalmente para as parcelas testemunha absoluta e NPK, não sendo observadas, entretanto, diferenças

Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais da Agricultura

estatísticas significativas relativa à emergência entre os tratamentos no segundo plantio. Pelos dados da Tabela 2, pode-se verificar que o selamento superficial surgiu com o aumento da quantidade de chuva sobre o solo sem cobertura vegetal, influenciando assim, a taxa de emergência. Outro dado interessante observado é que a quantidade total de chuva (outubro choveu 238,2 mm e novembro 155,7 mm) serve como um indicativo do risco de selamento superficial.

Apesar dos dados de precipitação terem sido obtidos por pluviômetro, foi possível associar a formação do selamento superficial com a quantidade e a época de ocorrência das mesmas, ou seja, o selamento ocorreu nos dois anos analisados, estando sempre associado às maiores quantidades de chuva.

Tabela 2. Dados relativos ao plantio e precipitações (ppt) ocorridos no período outubro/novembro/2000 e outubro/novembro 2001.

Outubro 2000		Novembro 2000		Outubro 2001		Novembro 2001	
Dia	Ppt (mm/dia)	dia	Ppt(mm/dia)	dia	Ppt (mm/dia)	dia	Ppt (mm/dia)
05	33,70	02	11,82	02	123,40	01	Replantio
06	6,63	12	18,36	08	18,48	04	10,50
12	40,00	13	1,50	09	15,12	12	29,75
25	42,24	14	21,37	16	12,50	13	13,00
31	Plantio	17	62,87	17	5,00	14	35,00
		18	79,47	19	Plantio	19	32,00
		21	28,42	20	22,00	23	20,00
		23	10,56	23	36,75	30	15,40
		25	20,12				
Total	122,60		254,50		238,20		155,70

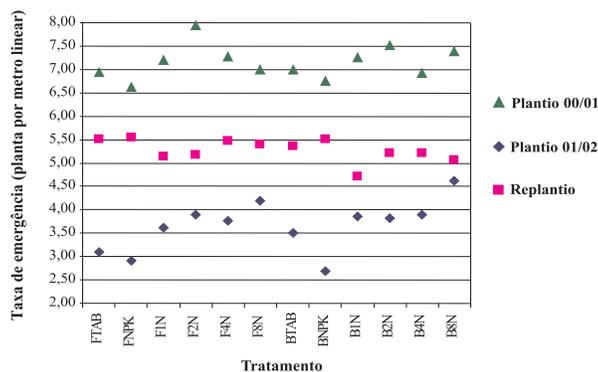


Fig. 12. Taxa de emergência das plântulas de milho nos anos de 2000/2001 e 2001/2002.

Considerações Finais

As técnicas utilizadas para estudar o selamento superficial do solo, mostraram-se eficientes, porém, a altura das amostras foi super dimensionada. Amostras com menores alturas podem melhorar a eficiência do método. A utilização da tomografia computadorizada utilizada de forma isolada é suficiente para fazer o estudo do selamento superficial. O lodo de esgoto incorporado ao solo com enxada rotativa age como cimentante, facilitando o surgimento de crosta e aumentando sua espessura, com conseqüente interferência negativa na germinação de sementes.

Referências

AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.848-851, 1981.

BAJRACHARYA, R.M.; COGLE, A.L.; LAL, R.; RAO, L.P.C.; SMITH, G.D. YULE, D.F. Surface crusting as a constraint to sustainable management on a tropical alfisol. 1. Soil physical properties. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.4, p.25-44, 1996.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.J.; GARDNER, W.R. **Física de solos**. 4.ed. México, DF: Union Tipografica Editorial Hispano Americana, 1973. 529p.

BOULET, R.; FRITSCH, E.; FILIZOLA, H.F.; ARAUJO FILHO, J.C.; LEPRUN, J.C.; BARRETO, F.; BALAN, E.; TESSIER, D. Iron bands, fragipans and duripans in the Northeastern plateaus of Brazil: properties and genesis. **Canadian Journal of Soil Science**, v.78, p.519-530, 1998.

CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B. Reações da matéria orgânica no solo. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo - Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. cap.5, p.69-89.

CASANELLAS, J.P.; REGUERIN, M.L.A.; LABURU, C.R. de. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente**. Estudios de suelos en el laboratorio. 2.ed. Madri: Mundi-Prensa, 1999. cap.4, p.55-74.

Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais da Agricultura

CASANELLAS, J.P.; REGUERIN, M.L.A.; LABURU, C.R. de. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente**. Estructura del suelo y propiedades relacionadas. 2.ed. Madri: Mundi-Prensa, 1999. cap.11, p.237-272.

CÁSSARO, F.A.M. **Tomografia de dupla energia simultânea para caracterização física de um meio poroso deformável**. 1994. 119p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

CEGARRA, J. Utilização e manejo de lodos de águas residuales urbanas con fines agrícolas: solos ecuatoriales, materia orgánica do solo. **Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia do Solo**, v.12, n.1, p.151-173, 1983.

DENARDIN, J.E.; FREITAS, P.L. de. Características fundamentais da chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, p.1409-1416, 1982.

DORNELAS DE SOUZA, M. **Infiltração de água em Lotossolo Roxo**. 1985. 133p. Dissertação (Mestrado) – UFRGS, Porto Alegre, RS.

EDWARD, W.W.; LARSON, E.E. Infiltration of water into soil as influenced by surface seal development. **Transactions of the ASAE**, v.12, p.463-465. 1969.

ELLISON, W.D. Studies of raindrop erosion. **Agricultural Engineering**, v.25, p.131-136, 181-182, 1944.

FANTE JÚNIOR, L.; OLIVEIRA, J.C.M.; BASSOI, L.H.; VAZ, C.M.P.; MACEDO, A.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Evaluation of a soil compaction as concerned to land use. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Agricultural tomography**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000. p.125-130.

FERRAZ, E.S.B.; MANSELL, R.S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma-ray attenuation methods**. Gainesville: University of Florida, 1979. 51p. (Technical Bulletin, 807).

GREENLAND, D.J.; OODES, J.M.; SHERWIN, T.W. Electron microscope observations of iron oxides in some red soils. **Journal of Soil Science**, v.19, p.123-126. 1968.

HSU, T.T.C. Mathematical analysis of shrinkage stresses in a model of hardened concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, v.60, p.371-389, 1963.

JONGERIUS, A. The role of micromorphology in agricultural research. In: BULLOCK, J.; MURPHY, C.P. (Ed.). **Soil micromorphology**. Techniques and applications. Madison: A.B. Academic Publishers, 1983. v.1, p.111-138.

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

KARANTHANANISIS, A.D. Solution chemistry of fragipans: thermodynamic approach to understanding fragipan formation. In: SMECH, N.E.; CIOLKOSZ, E.J. (Ed.) **Fragipans: their occurrence, classification, and genesis**. Madison: SSSA, 1989. cap.7, p.113-140.

KOOISTRA, M.J.; SIDERIUS, W. Micromorphological aspects of crust formation in a savanna climate under rainfed subsistence agriculture. In: SYMPOSIUM FLANDERS RESEARCH CENTER FOR SOIL EROSION AND SOIL CONSERVATION, Ghent, Belgium, 1985. **Proceedings...** Ghent, 1985. p.9-17.

MANNERING, J.V. **The relationships of some physical and chemical properties of soil to surface sealing**. 1967. 207p. Ph. D. Dissertation - Purdue University.

MARCIANO, C.R. **Incorporação de resíduos urbanos e as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho Amarelo**. 1999. 93p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

McINTIRE, D.S. Soil splash and formation of surface crust raindrop and over land flow. **Soil Science**, v.85, p.261-266. 1958.

MOLDENHOUER, W.C.; KEMPER, W.D. Interdependence of waterdrop energy and clod size on infiltration and clod stability. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.33, p.297-301. 1969.

MORIN, J.; BENYAMINI, Y. Rainfall infiltration into bare soils. **Water Resources Research**, v.13, p.813-817, 1977.

NAIME, J.M. **Um novo método para estudos dinâmicos, *in situ*, da infiltração da água na região não-saturada do solo**. 2001. 146p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NOVOTNY, E.H.; MARTIN-NETO, L. Propriedades coloidais da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. cap.4, p.42-67.

PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMANTE, G. Micromorphological investigation of the effect of sewage sludge applied to soil. In: BULLOCK, J.; MURPHY, C.P. (Ed.) **Soil micromorphology**. Madison: A.B. Academic Publishers, 1983. v.1, p.219-224.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Use of manure for soil improvement. In: WALLACE, A.; TERRE, R.E. (Ed.). **Handbook of soil conditioners: substances that enhance the physical properties of soil**. New York: Marcel Dekker, 1998. cap.4, p.119-139.

Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais da Agricultura

PIRES, L.F.; MACEDO, J.R.; DORNELAS DE SOUZA, M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. **Applied Radiation and Isotopes**, v.57, n.3, p.375-380, 2002.

PLA, I. A routine laboratory index to predict the effects of soil sealin on soil and water conservation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ASSESSMENT OF SOIL SURFACE SEALING AND CRUSTING, 1985, Ghent, Belgium. **Proceedings...** Ghent: ISSS; AISS; IBG, 1985. p.154-162.

RADCLIFFE, D.E.; WEST, L.T.; HUBBARD, R.K.; ASMUSSEN, L.E. Surface sealing in coastal plains loamy sands. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, p.223-227, 1991.

REZENDE, J.O. Compactação e adensamento do solo, metodologia para avaliação e práticas agrícolas recomendadas. (Compact disc) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997.

ROTH, C.H. Soil sealing and crusting in tropical South America. In: SUMMER, M.E.; STEWART, B.A. (Ed.). **Soil crusting: chemical and physical processes**. Saint Louis: Lewis Publishers, 1992. p.267-299.

SILVA, C.L.; KATO, E. Effect of superficial sealing on the saturated hidraulic conductivity of the surface a soil under "cerrado". **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.213-220, 1997.

SOMBROEK, W.G. Introduction to the subject. Assessment of soil surface sealing and crusting. In: SYMPOSIUM FLANDERS RESEARCH CENTER FOR SOIL EROSION AND SOIL CONSERVATION, Ghent, Belgium, 1985. **Proceedings...** Ghent, Belgium, 1985. p.1-7.

THOMPSON, C.H.; BRIDGES, E.M.; JENKINS, D.A. Pans In humus podzols (humods and aquods) in coastal Southern Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, v.34, p.161-182, 1982.

TSUTIYA, M.T. Características de bio sólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALÉM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Bio sólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. cap.4, p.89-131.

UEHARA, G.; JONES, R.C. Bonding mechanisms for soil crusts: Part I. Particle surfaces and cementing agents. In: CARY, J.W.; EVANS, D.D. (Ed.). **Soil crusts**. Tucson: University of Arizona, Agricultural Experiment Station, 1974. 58p.

Selamento Artificial em Latossolo Vermelho Distroférico Tratado com Lodo de Esgoto

VIEIRA, L.B.; SOUZA, C.M. de. **Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação: Módulo 7 - Mecanização em Áreas Irrigadas.** Brasília: Abeas; Viçosa: UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 1997. 213p.