

Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido

Henrique Nunes Parente¹ e Michelle Oliveira Maia¹

Resumo – A compreensão de como os atributos físicos dos solos respondem a intensas pressões de pastejo desmistifica diversas questões práticas e podem explicar as principais causas de degradação das pastagens. O pisoteio animal promove alterações nesses atributos quando não respeitado a pressão mínima de pré-consolidação dos solos, o que geralmente acontece e ocasiona a compactação dos mesmos. As pastagens cultivadas em regiões tropicais normalmente apresentam queda na produtividade após alguns anos de sua implantação, o que, via de regra, é atribuída ao manejo incorreto do solo, e normalmente está associada com a diminuição da fertilidade. Em pastagens nativas da região Nordeste, acredita-se que o principal fator seja a utilização de taxas de lotações inadequadas, com sobrecarga animal em função da disponibilidade de oferta forrageira, causando além de outros, danos às propriedades físicas dos solos. Particularmente neste ecossistema os solos podem apresentar algumas limitações físicas com relação à profundidade, topografia e capacidade de retenção de água. Diante da consulta na literatura, parece haver um consenso entre os trabalhos que o efeito da compactação reflete em comprometimento de outras características do solo, como densidade, estabilidade de agregados, infiltração de água, porosidade, entre outros. Alguns destes atributos, quando alterados pode ser de difícil reversão e certamente explicam o grau de degradação da maioria das pastagens. O animal por sua vez terá efeito sobre as propriedades físicas, ressaltando sua influência sobre a compactação do solo, refletindo em efeitos como a formação de crostas. A degradação de pastagens está associada à compactação do solo, que causa alterações na disponibilidade de nutrientes, devido a mudanças na mineralização da matéria orgânica ou dos resíduos vegetais e animais, bem como a alterações na movimentação dos nutrientes no solo.

Palavras-chave: degradação dos pastos, nutrientes, pisoteio, taxa de lotação.

Impact of grazing on soil compaction with emphasis on the Semi-arid

Abstract – The comprehension of how physical attributes of soils respond to intense grazing pressure reveals many practical questions and might explain the main causes of pasture degradation. Animal treading changes these attributes if the minimal pressure of soil pre-consolidation is not respected. Cultivated land in tropical regions generally present a decrease in yield after some years of implantation that is usually attributed to incorrect soil management and is generally associated to fertility decrease. It is believed that the main factor associated with that in native pastures in Northeast Brazil is the inadequate stocking rate with animal overload in function of forage availability, which negatively affects the physical properties of the soil, among others effects. Particularly in this ecosystem, soil may show some physical limitations related to depth, topography and water holding capacity. The literature shows a consensus among studies in that compaction effects compromises other soil traits, such as density, aggregate stability, water infiltration, porosity and others. Some of these changes are difficult to revert and certainly explain the degree of soil degradation of most pastures. On their turn, animals affect physical properties, emphasizing their influence on soil compaction that reflects in crust formation, for example. Pasture degradation is associated to soil compaction, which alters the availability of nutrients due to changes in the mineralization of the organic matter or vegetal and animal residues, as well as changes in the movement of soil nutrients.

Keywords: degradation of pasture, nutrients, treading, stocking rate.

INTRODUÇÃO

A alteração das propriedades físicas do solo causada pelo pisoteio animal em sistemas de produção intensivos tem sido tema de muitas discussões, porém, as informações disponíveis que avaliam este efeito são poucas em si tratando da região do Nordeste brasileiro, ao contrário das demais regiões, principalmente em condições de pastejo em pastagens cultivadas.

A utilização da pecuária semi-extensiva ou extensiva nas regiões semi-áridas passa a ser fator de alteração ambiental devido à lotação excessiva de animais em limites superiores à capacidade de suporte do ecossistema. Em médio prazo pode exercer forte pressão sobre o solo devido ao pisoteio

Recebido em Agosto de 2010, aceito em Abril de 2011

¹ Universidade Federal do Maranhão - Centro de Ciências Agrárias e Ambientais. Br 222, Km 74, Boa Vista Chapadinha, MA, Brasil. E-mail: hnparente@hotmail.com

excessivo provocando a compactação (na época chuvosa) e desagregação (no período seco) ocasionando efeitos negativos sobre as suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Em longo prazo, contribui para a irreversível degradação dos solos e da vegetação gerando áreas susceptíveis ao processo de desertificação.

Em pastagens nativas da região Nordeste, acredita-se que o principal fator seja a utilização de taxas de lotações inadequadas, com sobrecarga animal em função da disponibilidade de oferta forrageira, causando além de outros, danos às propriedades físicas dos solos. Outro fator é, sem dúvida, a utilização de sistemas de pastejo inadequados que não respeitam o desenvolvimento das plantas forrageiras.

De forma geral os ecossistemas que estão apresentando sinais de degradação estão sob forma de uso inapropriado que resultam no aumento da degradação da vegetação, promovendo erosão do solo e redução nos nutrientes. Estes processos causam redução na capacidade de estoque de água no solo, com conseqüente queda de produtividade da vegetação. Zhao et al. (2007) relatam que estudos envolvendo estratégias de sustentabilidade com processos emergenciais contra a degradação de pastagens são necessários para a estabilidade destes ecossistemas, pois segundo estes autores o pastejo associado com a atividade animal altera as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo.

Atributos físicos do solo favoráveis ao crescimento do sistema radicular são necessários para a obtenção e manutenção de elevadas produtividades. Os solos devem possuir suficiente espaço poroso (macro e microporos) para o movimento da água e gases, bem como resistência favorável a penetração e desenvolvimento das raízes. Sem dúvida, o comprometimento dessas propriedades é um dos principais responsáveis pela degradação das pastagens, que diante desta situação de solo reduzem consideravelmente a sua longevidade.

Face ao exposto, o objetivo com esta revisão é comentar sobre a resposta dos atributos físicos do solo em decorrência das pressões exercidas pelos animais em pastejo, enfatizando a sua importância na região do semiárido Brasileiro.

REVISÃO DE LITERATURA

Densidade do solo

Diante dos atributos físicos estudados na caracterização de um solo, talvez a densidade seja o mais utilizado, em função da sua facilidade de interpretação. A quantificação e o fornecimento de informações para os estudos agrônômicos e zootécnicos, pensando em produção de forragem/animal, parecem bastante consistentes, pois existe uma grande relação entre densidade e os outros atributos como porosidade, condutividade hidráulica, difusividade do ar, entre outros, além de ser utilizada como indicador do estado da compactação do solo (Camargo e Alleoni, 1997). Em uma análise dos resultados de pesquisa, percebe-se uma tendência de que com o aumento da densidade, ocorre diminuição da porosidade total, macroporosidade, condutividade hidráulica, absorção iônica, assim como o conseqüente aumento da microporosidade e da resistência mecânica à penetração do solo.

Flores et al. (2007) trabalhando com pastoreio contínuo no Rio Grande do Sul, em sistema de rotação de culturas (aveia preta + azevém e soja), não encontraram efeito das diferentes pressões de pastejo sobre os valores de densidade no solo. A macroporosidade total foi maior nas áreas sem pastejo, sendo o contrário encontrado para a microporosidade. Todavia, vale ressaltar que o período de pastejo trabalhado pelos autores foi bastante curto, sendo apenas de quatro meses em função do sistema adotado. Certamente a intercalação de culturas e/ou atividades é uma estratégia para minimizar alterações nos atributos do solo, como geralmente acontece no ecossistema da região Sul do país. Este resultado mostra a importância da cobertura vegetal em promover a estabilidade dos

agregados e manter as propriedades físicas do solo.

No entanto, na região Semiarida do Brasil, com predominância da vegetação caatinga, não existe essa alternância de atividades em uma mesma área, pois se utiliza sistemas de pastejo sob lotação contínuas e extensivos. Essa característica, quase sempre, não permite ao solo a oportunidade de reabilitação de suas propriedades físicas, aliados as suas próprias características intrínsecas que podem comprometer os mesmos em longo prazo. Certamente a falta de efeito encontrado no trabalho conduzido por Flores et al. (2007) deve-se ao efeito da palhada (camada de resíduo) na pastagem de aveia+azevém, que exerce papel fundamental na composição e incremento de matéria orgânica, contribuindo para a melhoria das propriedades físicas do solo.

A capacidade da planta em absorver água pode ser reduzida com a compactação do solo, associada a pequenos períodos de chuva nas regiões semi-áridas que limitam o crescimento das plantas e reduz o aporte de liteira, conseqüentemente o aporte de carbono orgânico. Entretanto, este é um efeito indireto do pastejo sobre a infiltrabilidade do solo, que segundo Zhao et al. (2007), ainda não está muito bem descrito e quantificado.

Porosidade

A porosidade de um solo possui grande importância e serve como parâmetro de avaliação do mesmo, e ainda, serve como indicador de manejo, pois de acordo Epstein e Bloom (2006) *Apud* Lima et al. (2007), este atributo está estreitamente ligado à dinâmica do armazenamento e do movimento de solutos e de circulação de gases no seu interior, essenciais aos processos bioquímicos das plantas, sobretudo aqueles relacionados com a produtividade vegetal.

Lima et al. (2007) cita que a porosidade do solo é referida como ideal quando se apresentar com $0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do seu volume total, no qual a microporosidade, responsável pelo armazenamento de água, variaria entre $0,250$ e $0,330 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já a macroporosidade, representada pelo volume de poros responsáveis pela aeração das raízes, estaria entre $0,170$ e $0,250 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Dentre as propriedades físicas sujeitas as alterações pela presença dos animais, as relativas ao espaço poroso, merecem especial atenção, pois é o local que ocorrem os principais fenômenos que regulam o crescimento das plantas (Siqueira Júnior, 2005). A redução do espaço poroso é provocada pelo aumento da densidade do solo, que por definição representa a compactação adicional do solo, ou seja, promove degradação da estrutura do solo (Dias Júnior, 2000). Neste sentido, para que haja a mínima sustentabilidade do sistema de produção é fundamental que haja preocupação e prevenção da degradação das pastagens relacionada aos atributos físicos e as interações no compartimento solo (Figura 1). Estes impactos acarretam em redução de produtividade, problemas de conservação do solo, alterações na composição botânica e principalmente a diminuição da persistência das espécies forrageiras.

Schneider et al. (1981) avaliando o efeito do pisoteio bovino sobre algumas propriedades físicas do solo, em pastagem consorciada de *Paspalum guenoarum* e *Desmodium intortum*, submetida à pastejo direto, encontraram que os dados de resistência à penetração maiores na camada de 0-5 cm, indicando que a compactação tendeu a ser maior onde a pastagem recebeu o maior peso acumulado do gado. Segundo os autores, a compactação ocorrida na pastagem se refletiu também na infiltração de água, que em todas as parcelas experimentais diminuiu acentuadamente com a continuidade do pastejo.

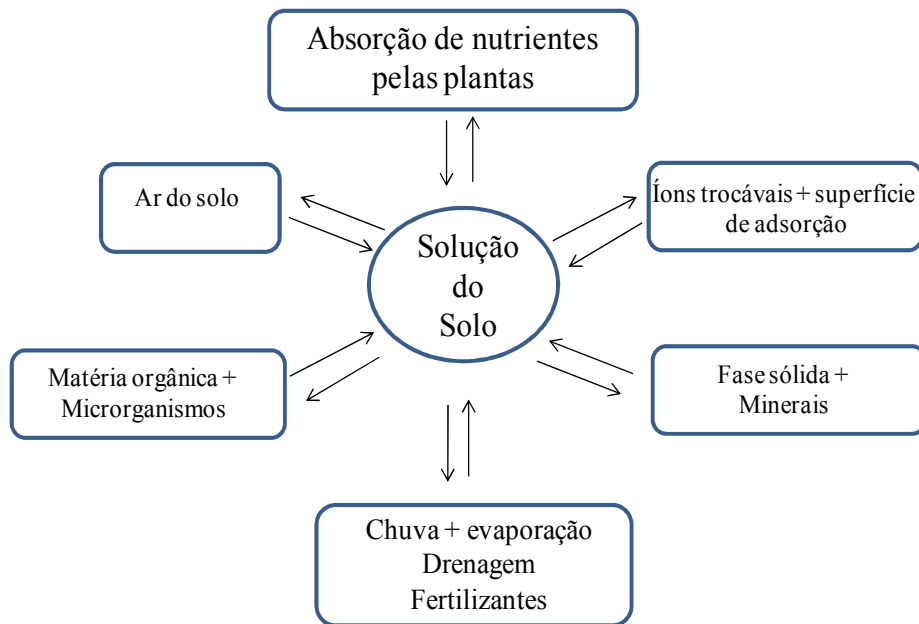


Figura 1. Equilíbrio que acontece nos solos. (Adaptado por Resende et al. 1997). Balance is happening on soil. (Adapted of Resende et al. 1997)

Segundo Zanine e Santos (2004), boa parte da competição das plantas ocorre abaixo do solo, sendo que neste ambiente as plantas concorrem por vários recursos, incluindo água e diversos minerais, que diferem entre si por algumas características, salientando neste momento a mobilidade dentro do solo. Neste contexto, pode-se ressaltar a afirmação de Casper e Jackson (1997) ao relatarem que a competição abaixo do solo quase sempre reduz a performance das plantas, sendo esta a principal forma de competição que ocorre em solos áridos ou semi-áridos.

Uma vez que a absorção de nutrientes ocorre, principalmente, em função dos processos de difusão, fluxo de massa e interceptação radicular, e estes estão atrelados a características físicas do solo, ressaltam-se ainda mais a importância da manutenção destas características em condições que não comprometam o crescimento das plantas. Vale ressaltar que a influência da compactação na difusão dos nutrientes do solo ainda não está muito clara. Existem experimentos nos quais a compactação aumenta, e outros nos quais ela diminui o coeficiente de difusão dos íons (Camargo e Alleoni, 1997).

Compressibilidade

Diversos atributos como densidade, porosidade, taxa de infiltração e resistência à penetração têm sido utilizados para quantificar a compactação dos solos, porém somente esses atributos físicos não permitem medir e avaliar o processo de compressão do solo, feito por meio da compressibilidade (Lima et al., 2004). Essas curvas de compressibilidade ou curvas de compreensão uniaxial permitem que possamos determinar a pressão de pré-consolidação, que segundo Flores et al. (2007) têm grande aceitação no meio científico como indicador da capacidade de suporte do solo.

De acordo com Dias Júnior et al. (2004), a curva de compressão do solo tem sido frequentemente utilizada em estudos de compactação. Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou o índice de vazios. A pressão de pré-consolidação divide essa curva em uma região de deformações recuperáveis e em uma de deformações não-recuperáveis. Por esse motivo, a pressão de pré-consolidação tem sido usada como uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos. Ainda, a obtenção de pressão de pré-consolidação se dá a partir de um método denominado ensaio de consolidação que segundo a

publicação EM 1110-2-1906 (US Department of the Army, 1970) *Apud* Silva et al. (2007), consiste no processo de transferência gradual de uma carga aplicada ao solo até que todos os vazios deste sejam comprimidos. A quantidade de água que sai da amostra depende da intensidade da carga e da compressibilidade do solo, enquanto a taxa com que a água é drenada depende do coeficiente de permeabilidade, da densidade do solo e também da compressibilidade da amostra (US Department of the Army, 1970).

Esse conhecimento é fundamental no manejo do pastejo, pois quando as pressões de pastejo forem maiores que a pressão de pré-consolidação acarretará em compactação adicional do solo. Caso isso venha a ocorrer no campo experimental, efeitos diretos e irreversíveis acontecerão sobre o sistema radicular das plantas, que por sua vez irá afetar diretamente a produção de biomassa das mesmas, o que não é interessante, principalmente, em plantas forrageiras, onde a máxima produção de biomassa é o alvo do manejo.

Assim sendo, a pressão de pré-consolidação pode ser usada como um indicador quantitativo da sustentabilidade da estrutura dos solos (Dias Júnior, 2000).

De acordo com Novais e Smyth (1999), as menores respostas à adubação observadas em nossos solos devem-se a degradação de suas propriedades físicas, levando ao aumento de suas densidades e como consequência, à maior adsorção de fósforo. Nestas condições ocorre uma redução do fluxo difusivo de fósforo (Figura 2). Efeitos desta natureza devem ocorrer para outros elementos.

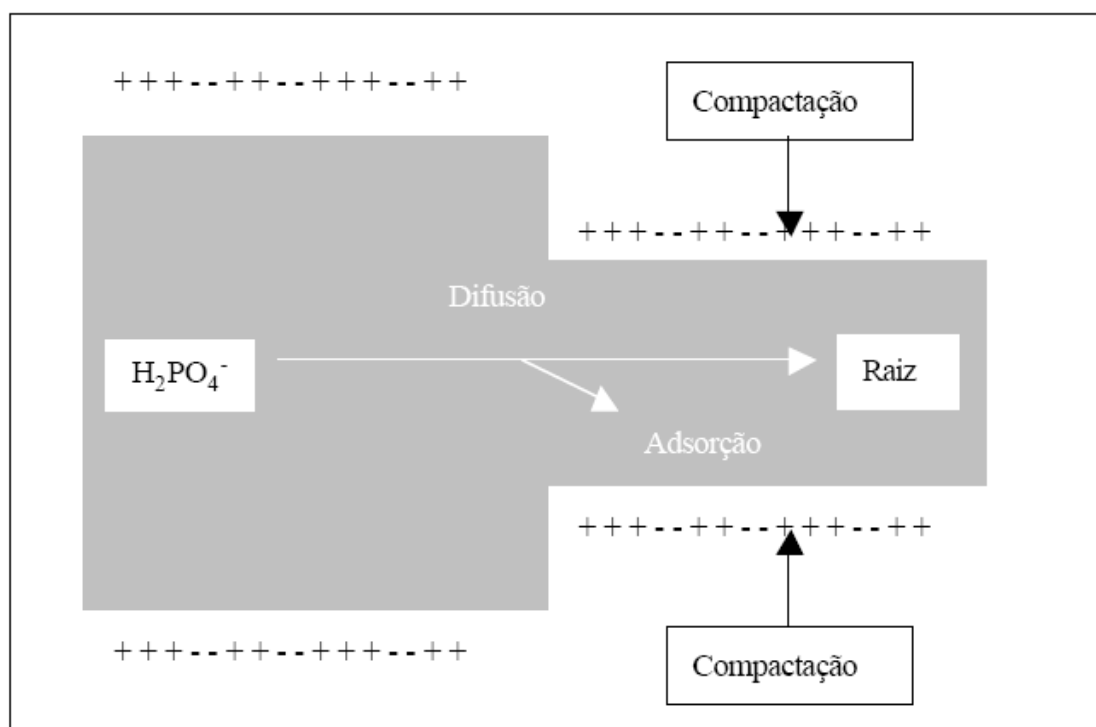


Figura 2. Efeito da compactação de um solo altamente intemperizado sobre o fluxo difusivo de fósforo no solo. (Novais e Smyth, 1999). Effect of soil compaction in a highly weathered pervasive on the flow of phosphorus in the soil

A interceptação de nutrientes pelo sistema radicular é fundamental para o crescimento e acúmulo de biomassa aérea por parte das plantas. A habilidade de ocupação espacial depende de várias características das raízes, incluindo taxa de crescimento relativo, biomassa, densidade de pêlos radiculares e área superficial total (Casper e Jackson, 1997). Quanto maior esta eficiência de penetração e densidade do sistema radicular, maior a possibilidade da planta em retirar água do solo

e garantir sua persistência em condições de estresse.

Nas condições de pastejo, as plantas forrageiras estão quase sempre submetidas a algum tipo de estresse (desfolhação) e neste caso, condições adequadas de solo são premissas básicas para o restabelecimento do crescimento e acúmulo de biomassa.

Em trabalho conduzido por Moraes (1991), foi verificado em uma pastagem formada de capim pangola, redução superior a 50% na biomassa do sistema radicular quando pastejado sob alta pressão, em relação ao tratamento pastejado com baixa pressão de pastejo, confirmando o efeito do pisoteio e da alta pressão de pastejo sobre o solo e o sistema radicular da plantas, pois nessas condições o menor volume de solo implica na redução de reservas de água e nutrientes para a planta.

A pressão de pré-consolidação, como dito anteriormente, é obtida em laboratório por meio do ensaio de compressão uniaxial, o qual requer um aparelho sofisticado para a sua realização, denominado de consolidômetro. Além do tempo gasto na realização do ensaio, há necessidade de usar um método gráfico ou de planilhas para a sua determinação. Uma maneira alternativa que visa minimizar este problema seria a calibração da pressão de pré-consolidação com outras medidas de fácil e rápida obtenção.

Em função do tempo despendido a campo e da necessidade de aparelhos sofisticados, vários são as tentativas propostas para se tentar correlacionar este método com alguns mais práticos. Em experimentos grandes ou em áreas maiores de produção agrícola e/ou de forragem, a avaliação estrutural de alguns solos tem sido feitas com auxílio de modelos de predição da capacidade de suporte de carga do solo (Silva, 2002).

De acordo com Silva et al. (2004) a utilização de modelos de capacidade de suporte de carga do solo para prever os efeitos do tráfego sobre a estrutura do solo preconiza o uso da pressão de pré-consolidação. Dias Júnior et al. (2004) realizou um experimento com o objetivo de propor um método alternativo de avaliação da pressão de pré-consolidação por meio de um penetrômetro, entendendo que este aparelho têm uma aplicação mais rápida e prática, podendo ser bastante útil no monitoramento da compactação do solo. Os autores concluíram que as pressões de pré-consolidação podem ser determinadas em função da resistência à penetração do solo.

Silva et al. (2007) em virtude da dificuldade de se obter o equipamento próprio, propôs desenvolver e avaliar um consolidômetro pneumático-eletrônico que possibilitasse a obtenção da pressão de pré-consolidação, que é a propriedade mecânica utilizada na predição da capacidade de suporte de carga, em função do teor de água no solo. O equipamento foi desenvolvido no Núcleo de Estudos de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA) da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, campus de Botucatu, SP. A avaliação ocorreu por meio de ensaios uniaxiais, os quais foram realizados em corpos-de-prova de duas camadas, superficial e subsuperficial, de um Latossolo Vermelho. Os autores encontraram que houve variação no recalque dos corpos de prova de acordo com o aumento na pressão de consolidação e teor de água, bem como validaram o equipamento em função das curvas de compressão e das equações obtidas.

Em áreas de pastejo com alta frequência e intensidade, alternativas como estas deveriam ser rotineiras, a fim de garantir condições ao desenvolvimento das plantas forrageiras. Novamente, nos sistemas de pastejo na vegetação da caatinga, a utilização da serrapilheira com parte da dieta dos pequenos ruminantes, principalmente no período seco do ano, promove a exposição total do solo em alguns momentos, sendo este efeito bastante negativo sobre a manutenção da matéria orgânica nesses solos, que por sua vez iriam contribuir para a estabilização e manutenção das propriedades físicas dos mesmos.

Sabe-se que a pressão de pastejo exercida pelos animais acontece principalmente na camada

superior (0-5 cm), onde se encontra a maior quantidade de matéria orgânica (Horizonte A). Assim, o pisoteio causa efeito na decomposição e distribuição dos resíduos, pois o animal influencia no sistema pelo tipo de pastejo e de deposição das excretas, podendo afetar a eficiência da ciclagem dos nutrientes minerais. No entanto, cabe ao manejador entender que o pisoteio pode ocorrer no solo sem prejudicá-lo, desde que essa pressão não atinja a pressão mínima de pré-consolidação, a partir da qual nesse ponto passa a ser não recuperável, e o solo pode sofrer compactação, entendendo que a manutenção de uma camada de cobertura (liteira) contribui para aumentar o limite mínimo da pressão de pré-consolidação.

A compactação dos solos depende, entre outros fatores do teor de umidade, entretanto, para determinada condição de textura e teor de carbono orgânico no solo, o fator que determina a magnitude da deformação do solo é o conteúdo de água (Dias Júnior, 2000). Todavia, em condições de pastejo em sistemas extensivos dificilmente se terá condições de realizar este monitoramento, impedindo o pisoteio no momento em que o solo está com alto teor de umidade, pois os animais permanecem na área durante todo o tempo. No entanto, em condições de sistema de lotação rotacionada, com pastejo super intensivo este controle deve ser realizado, a fim de não comprometer a qualidade física do solo. Este tipo de sistema é frequentemente adotado em fazendas altamente tecnificadas para produção leiteira, que trabalham com forragens altamente produtivas (*Cynodon*), sob adubação e irrigação constantes.

A possibilidade de manutenção das propriedades do solo em condições normais sob pastejo é possível. Grande parte desta possibilidade se dá em função da grande variabilidade espacial que ocorre naturalmente com os atributos físicos do solo (Tsegaye e Hill, 1998). Todavia, a distribuição desuniforme do pisoteio, com quase sempre formações de grupos de pastejo pode diminuir a variabilidade dessas condições ao longo do tempo (Lima et al., 2004). Essa explicação está em pleno acordo com as áreas pastejadas intensivamente em sistemas de pastejo sob lotação contínua, podendo este ser o grande agravante nas regiões de caatinga, uma vez que os pequenos ruminantes (ovinos e caprinos), predominantemente possuem hábito de pastejo gregário, ou seja, quase sempre eles pastejam agrupados concentrando o efeito do pisoteio.

Zhao et al. (2007) em experimento conduzido com diferentes períodos de pastejo, na Mongólia, relataram que o pastejo promoveu homogeneização espacial das propriedades físicas do solo. Vale ressaltar que o experimento foi conduzido por um longo período, tendo áreas com mais de 20 anos de pastejo por diferentes espécies animais.

Resistência mecânica do solo

Na utilização do penetrômetro, boas estimativas de resistência mecânica do solo a penetração de raízes é fornecido, contudo, esses valores têm relação indireta com o conteúdo de água no solo e direta com a densidade, exigindo maior cuidado na análise dos resultados, bem como uma caracterização da umidade deste solo no momento das avaliações. De acordo com Murphy e Barreto (1995) a resistência do solo a penetração das raízes é drasticamente alterada quando ocorre degradação da estrutura do solo.

Sobrinho e Gastaldi (1996) observaram a ocorrência de redução do grau de compactação do solo em todos os tratamentos com taxas de lotação de 25, 40, 55 ovinos/ha, sendo mais acentuado nas camadas do solo e na menor lotação. Os autores observaram que a utilização do penetrômetro de impacto resultou em interpretações semelhantes às obtidas com a determinação da densidade global do solo, mostrando-se influenciada por pequenas variações na umidade do solo.

É sabido que as raízes das plantas ao entrarem em contato com uma camada compactada apresentam respostas imediatas que prejudicam o desenvolvimento das mesmas, comprometendo a estabilização do sistema radicular e conseqüentemente limitando o crescimento da parte aérea.

Neste momento as plantas precisam explorar a porosidade presente no solo ou forçar a abertura de novos poros, superando a resistência oferecida pela matriz do solo (Dexter, 1988). Diante disto, verifica-se uma redução na taxa de alongamento do sistema radicular, tendo como efeito direto menor volume de solo para retirada de nutrientes, bem como limitação da camada superior para suprimento da demanda hídrica. Certamente, esta situação deve-se se agravar para a maioria das pastagens, que são culturas perenes, e uma vez comprometidas a sua implantação (sistema radicular) fica difícil a recuperação das mesmas.

Parecem existir evidências experimentais que raízes crescendo em condições desfavoráveis enviam sinais para as folhas. Supõe-se que estes sinais sejam de natureza bioquímica, liberadas na corrente transpiratória, como por exemplo, o ácido abscísico (Hurley e Rowarth, 1999).

Outro aspecto relevante na resistência à penetração do sistema radicular no solo é o teor de umidade. Existe uma correlação inversa entre estes dois fatores, sendo que à medida que se reduz a umidade do solo, aumenta-se a dificuldade de penetração das raízes, ou seja, quanto mais seco o solo maior dificuldade de penetração do sistema radicular. Portanto, em solos rasos, com baixa capacidade de retenção de água, estratégias de conservação da cobertura vegetal a fim de propiciar melhorias nas condições físicas e promover uma maior retenção de água seriam necessárias para facilitar a penetração e estabelecimento das raízes. Desta forma, haveria uma maior “tempo útil” para que a planta pudesse absorver a água disponível naquele momento.

Em situação contrária, solos com altos teores de argila, em que freqüentemente ocorre enxarcamentos, a ocupação dos espaços porosos pela água em relação ao ar, pode acarretar em condições de anaerobiose, ou seja, restrição de oxigênio. Em casos onde a porosidade de aeração é menor que 10%, a taxa de fluxo de O_2 em direção ao sistema radicular das plantas é severamente prejudicado, afetando assim os processos metabólicos e o crescimento da raiz (Leão, 2002).

Existe uma diferença de composição e concentração entre o ar atmosférico e o ar do solo. O segundo apresenta maiores níveis de CO_2 em função da atividade respiratória dos microorganismos, que consomem O_2 em maior quantidade. Sendo assim, a respiração do sistema radicular das plantas depende da concentração de O_2 no solo, bem como da sua taxa de difusão deste elemento. Leter (1985) *Apud* Leão (2002) propõe uma taxa de liberação de $0,2 \mu g \text{ cm}^{-2}$ como sendo o mínimo requerido para o crescimento radicular adequado. Esta taxa de difusão está diretamente relacionada com a porosidade de aeração do solo, ou seja, os espaços livres de água. Como se sabe, o pisoteio excessivo, acima da pressão de pré-consolidação, afeta a estrutura dos poros e certamente a aeração do mesmo (taxa de difusão), acarretando em problemas irreversíveis para o crescimento do sistema radicular das plantas.

Outro aspecto relevante é o efeito que pisoteio animal pode afetar a estabilidade dos agregados do solo. Alterações nesta estrutura podem acarretar em comprometimento da aeração e transporte de nutrientes no solo, refletindo na absorção e crescimento das plantas. Para Vogel (1997) a geometria espacial dos poros no solo é considerada decisiva na compreensão do transporte de água, gás e soluto. Ainda segundo o autor, a condutividade está relacionada com a característica geométrica do espaço poroso, bem como do seu arranjo.

Baudena et al. (2007) registraram que a vegetação é parte de um complexo sistema em que a atmosfera, os organismos e o solo interagem entre si em diferentes escalas espacial e temporal. A dinâmica da vegetação é afetada pela chuva e pelas características do solo, que exerce importante controle no balanço de água.

Desta forma, entende-se que esses atributos respondem a alteração nas propriedades físicas do solo, que podem ser ocasionadas pelo pisoteio animal.

Curvas de retenção e infiltração de água

Dentro do contexto de infiltração de água, uma característica marcante existente em solos tropicais e subtropicais é a presença de crostas (Valentin e Bresson, 1992), sendo estas resultantes de processos complexos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa. Estas crostas são responsáveis pela diminuição da infiltração da água no solo e pelo aumento do escoamento superficial das águas provenientes das chuvas e irrigação, que pode potencializar os processos erosivos (Souza et al., 2007).

De acordo com Antonino et al. (2004) a condutividade hidráulica da camada superficial do solo desempenha papel importante na partição da quantidade de água, seja de precipitação pluviométrica ou de irrigação, que atinge o solo em infiltração e/ou escoamento superficial. Geralmente, as crostas presentes nos solos do Semi-árido brasileiro ocorrem nas camadas superficiais (primeiros milímetros) e são responsáveis por grande parte do escoamento superficial.

Imoff et al. (2000) estudando o efeito de diferentes pressões de pastejo em capim elefante, utilizando a curva de retenção do solo, relatam que informações importantes para o manejo dos solos nessas condições podem ser obtidas. Segundo os autores, conforme a umidade aumenta, podem ser admitidos maiores valores de densidade no solo, sem que o valor limite de 2,5 MPa de resistência a penetração seja superado. A densidade do solo e o conteúdo de umidade são parâmetros físicos facilmente medidos e que a partir do conhecimento de um pode-se estabelecer o limite crítico do outro. Por fim, o autor conclui que a utilização desse atributo é parâmetro útil na avaliação da qualidade física do solo, permitindo identificar limites de resistência mecânica e estabelecer densidade e umidade crítica para o desenvolvimento de plantas.

Greenwood et al. (1998) observaram que a compactação do solo provocada pelo pastejo de ovelhas limitou-se aos primeiros 5 cm do solo, mas mesmo assim, o pastejo excessivo resultou em aumento da porosidade, da densidade do solo e resistência a penetração, e conseqüentemente, reduções na condutividade hidráulica saturada dos solos estudados. Com o aumento da compactação e/ou adensamento, a infiltração de água no solo sofre grande redução, promovendo acentuado escoamento superficial de água e maior possibilidade de arraste de solo e nutrientes.

Albuquerque et al. (2001) trabalhando com diferentes sistemas de uso da terra, conduziram um estudo por oito anos e relataram perdas de sedimentos de 3 e 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ em pastagens e campos agrícolas, respectivamente, enquanto nos solos sob caatinga as perdas médias foram de cerca de 0,1 t ha⁻¹ ano⁻¹. Os autores ainda relataram grande variabilidade nas perdas por erosão, relatando valores da ordem de 438 t ha⁻¹ de solo em solos descobertos em um só ano.

Valentin e Bresson (1992) consideram três tipos de crosta, sendo as crostas de superfície, aparentemente mais envolvidas com os processos de erosão e perda de água. Estas apresentam maior densidade e menores poros, e conseqüentemente, uma condutividade hidráulica saturada menor do que o solo subjacente (Souza et al. 2007), acarretando uma menor taxa de infiltração de água. No caso particular do Nordeste brasileiro, esta parece ser uma das características mais agravantes no que diz respeito ao armazenamento de água no solo, pois grande parte a água é escoada em função da presença destas crostas. Aliada a este fator, esta região apresenta grande quantidade de solos rasos e com baixa capacidade de retenção de água, além de apresentar uma evapotranspiração potencial de até 2000 mm, o que certamente otimiza a perda de água no sistema solo-planta.

Zhao et al. (2007) em estudo realizado na Mongólia, avaliaram o efeito da diferentes pressões de pastejo de ovinos nas propriedades físicas e mecânicas do solo e suas interações. Os autores trabalharam com cinco áreas sob diferentes períodos de pastejo e relataram através da análise dos resultados que a distribuição espacial das propriedades do solo foi descrita através de modelos exponenciais. Neste experimento o pastejo promoveu redução no conteúdo de água no solo e no estoque de carbono e promoveu aumento na densidade do mesmo.

Sendo assim, em uma situação em que o manejo do pastejo possa vir comprometer essas propriedades, agrava-se ainda mais esta situação, reduzindo a produtividade das pastagens em longo prazo. Nesta ocasião, o ajuste na taxa de lotação animal, evitando a degradação da vegetação nativa e o superpasteio, que pode comprometer as propriedades físicas do solo, é ferramenta importante que auxilia na manutenção do equilíbrio do ecossistema.

Souza et al. (2007) trabalhando em um solo cultivado com mamona avaliaram o efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas. Os autores determinaram a condutividade hidráulica e a sorvidade, por intermédio da análise do regime transitório da infiltração tridimensional realizadas em superfícies com a presença e a ausência de crosta e concluíram que a análise do regime transitório da infiltração, pelos métodos de Haverkamp, permitiu a determinação das características hidráulicas das superfícies dos solos com a presença e ausência de crosta. Os solos sem crosta foram em média quase 3 vezes mais condutores que os com crosta, em função da quantidade de poros hidraulicamente ativos por unidade de área.

Para Luz e Herling (2004) o efeito na compactação é diferente, decorrente da espécie e da categoria dos animais utilizados em pastejo. A compactação é diferente para todas as espécies, sendo maiores para os bovinos. A compactação ainda pode influenciar os organismos do solo e do crescimento radicular das plantas.

Outro aspecto a ser considerado é que as espécies forrageiras exercem grande função nas respostas do solo ao efeito do pastejo animal sobre a taxa de infiltração no solo. Alegre e Lara (1991) observaram uma menor taxa de infiltração nas pastagens constituídas de espécies de hábito ereto que não protegem o solo do efeito do pisoteio, favorecendo a compactação.

De acordo com Siqueira Júnior (2005) pode-se obter algum efeito benéfico de descompactação do solo pela ação do sistema radicular e pela atividade da mesofauna do solo. Isto é possível de se obterem em uma situação de descanso da pastagem, onde haverá um intenso crescimento da parte aérea e conseqüentemente do sistema radicular. Novamente a necessidade de ajuste nos períodos de pastejo na caatinga deve ser considerada, pois em função do consumo da serrapilheira pelos animais, como já relatado, e a exposição do solo, esta prática de descanso poderá amenizar em algumas situações.

Drescher et al. (2007) trabalhando em cinco áreas com diferentes condições de solo: com cobertura natural de *Lupinus albus*, arenizado com revegetação de *Lupinus albus* (há três anos), arenizado com revegetação de *Lupinus albus* (há um ano), área de campo nativo e solo arenizado, verificaram que nas áreas de campo nativo a dinâmica populacional da fauna edáfica foi alterada devido ao pastejo contínuo da área, que remove a cobertura vegetal e segundo esses autores esta propicia fonte de alimentos, maior retenção de água e amenização da temperatura do solo. Duarte (2004) verificou redução acentuada de alguns organismos edáficos da macrofauna, em ambientes que sofreram maiores alterações, seja pela redução da liteira, seja pela maior pressão de pastejo.

De forma complementar, Greenwood et al. (1998) em estudo de longo prazo avaliaram o potencial de regeneração natural das propriedades físicas degradadas de solos, após a exclusão do pastejo, observaram que depois de dois anos e meio houve um significativo aumento da condutividade hidráulica não saturada dos solos estudados quando comparados aos tratamentos de controle que continuavam sendo pastejados. A condutividade hidráulica não saturada e a densidade do solo das camadas superficiais das parcelas não pastejadas, foram comparáveis a pastagens não utilizadas há 27 anos. Ainda segundo os autores, a recuperação natural das propriedades físicas do solo nas áreas estudadas se deu em função da atividade biológica e ciclos de umedecimento e secagem na ausência do efeito de compactação pelo pisoteio animal.

Intervalo hídrico ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é considerado um índice de qualidade estrutural do solo, pois, integra num só índice fatores físicos que estão relacionados com o desenvolvimento das plantas, sendo estes: porosidade de aeração superior a 10 %, água no solo a tensões entre a capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente e teor de água no solo onde a resistência mecânica do solo é inferior a 2 MPa (Silva et al., 2004).

Segundo Leão (2002) a grande maioria dos estudos que trata da relação entre pastagens cultivadas e propriedades físicas do solo realiza a quantificação de propriedades que afetam direta ou indiretamente o crescimento vegetal, porém de forma independente, de modo que o estabelecimento de uma correlação com o crescimento das plantas se torna difícil. O intervalo hídrico ótimo (IHO) parece ser uma ferramenta de alto valor prático, pois leva em conta características como aeração, resistência a penetração e retenção de água, atrelado a uma única característica: a densidade do solo. Ainda segundo o autor, o IHO corresponde à faixa de umidade do solo em que o crescimento vegetal é menos limitado, abrangendo o conceito da água disponível, mas levando também em consideração as limitações causadas por uma elevada resistência do solo à penetração radicular e uma má aeração no ambiente do solo.

A interpretação do conceito do IHO engloba, dentre outros, alguns conceitos básicos utilizados no manejo, como capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Neste sentido, este conceito pode ser melhor compreendido levando-se em consideração a forma diferencial com que as propriedades físicas do solo atuam sobre o crescimento das plantas e caracterizam o ambiente no qual as raízes se desenvolvem.

CONCLUSÕES

Em função dos reduzidos trabalhos reportados na literatura sobre este assunto, em particular na região Nordeste, entende-se que taxas de lotações elevadas em sistemas de pastejo sob lotação contínuas e intensivas implicam em alterações desfavoráveis na densidade do solo e a resistência à penetração. Definições de períodos de descanso e conhecimento das propriedades físicas do solo, dentro do contexto solo-planta-animal são imprescindíveis para a manutenção das pastagens e garantir o sucesso da atividade pecuária.

A utilização de modelos e/ou instrumentos mais práticos com o intuito de monitorar as áreas pastejadas com maiores frequências é determinante na manutenção das propriedades físicas dos solos, em particular na região semi-árida.

É necessária a compreensão de como os atributos físicos respondem a intensas pressões de pastejo e como as plantas forrageiras respondem a estas alterações para que tomadas de decisão possam ser melhores subsidiadas.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO; F. SRINIVASAN, V. S.; CATANEO, A. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvisol em Sumé - PB. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.121-128, 2001.

ALEGRE, J. C.; LARA, P. D. Efecto de los animales em pastoreo sobre las propiedades físicas de suelos de la región tropical húmeda de Peru. **Pasturas Tropicales**, c.13, p.18-23, 1991.

ANTONINO, A. C. D.; RUIZ, C. F.; SOUZA, E. S.; NETTO, A. M.; ANGULO-JARAMILLO, R. Distribuição probabilística do fator de escala de dois solos do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n.2/3, p.220-224, 2004.

BAUDENA, M.; BONI, G.; FERRARIS, L.; VON HARDENBERG, J.; PROVENZALE, A. Vegetation response to rainfall intermittency in drylands: results from a simple ecohydrological box

- model. **Advances in Water Resources**, v.30, p.1320–1328, 2007.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 1997. 132p.
- CASPER, B. B.; JACKSON, B. R. Plant competition underground. **Annual reviews Ecology Systemic**, v.28, p.545-570, 1997.
- DEXTER, A. R. advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research, Amsterdam**, v.11, n.1, p.199-238, 1988.
- DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, A. R.; FONSECA, S.; LEITE, F. P. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.805-810, 2004.
- DIAS JUNIOR, M. de S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: UFV, 2000. 352p.
- DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; ROVEDDER, A. P. M.; DORNELES, F. O. Mesofauna como bioindicador para avaliar a eficiência da revegetação com *Lupinus albus* em solo arenizado do sudoeste do Rio Grande do Sul. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Gramado. **Anais...** Gramado, SBCS, 2007. CD-ROM.
- DUARTE, M. M. Abundância de microartrópodes do solo em fragmentos de mata com araucária no sul do Brasil. Iheringia, **Ser. Zool.**, Porto Alegre, v.94, n.2, p.163-169, 2004.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2.ed. Londrina: Planta, 2006. 403p.
- FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, G. D. B. J.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.771-780, 2007.
- GREENWOOD, K. L.; MACLEOD, D. A.; SCOTT, J. M.; HUTCHINSON, K. J. Changes to soil physical properties after grazing exclusion. **Soil use and Management**. v.14, p.19 24, 1998.
- HURLEY, M. B.; ROWARTH, J. S. Resistance to root growth and changes in the concentrations of ABA within the root and xylem sap during root-restriction stress. **Journal of Experimental Botany**, v.50, n.335, p.799-804, 1999.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1493-1500, 2000.
- LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002. 58f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Piracicaba.
- LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.31, p.1233-1244, 2007.
- MORAES, A. Produtividade animal e dinâmica de uma pastagem de pangola (*Digitaria decumbens* Stent), azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) e trevo branco (*Trifolium repens* L.), submetida a diferentes pressões de pastejo. 1991. 200f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399p.

- SCHNEIDER, P.; SCOPEL, I.; KLAMT, E. Efeito de pastagem cultivada, submetida a diferentes intensidades de pastejo, em propriedades físicas de um solo laterítico hidromórfico. In: III ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DE SOLO, 1981, Recife. **Anais...** Recife, 1981.
- SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MASQUETTO, B. J. Consolidômetro: equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31p.617-615, 2007.
- SILVA, V. R.; REICHERT, M. J.; REINERT, J. D. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em Plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.399-406, 2004.
- SILVA, R. B. Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados. 2002. 142f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras
- SIQUEIRA JÚNIOR, L. A. Alterações de características do solo na implantação de um sistema de integração agricultura-pecuária leiteira. 2005. 93f. Dissertação (Mestrado) – Universidade federal do Paraná.
- SOBRINHO, A. G. S.; GASTALDI, K. A. Efeitos de diferentes taxas de lotação em pastagens de coast cross (*Cynodon dactylon* (L) Pers) sobre a produção ovina. In: XXXIII REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 1996, Fortaleza, **Anais...** Fortaleza: SBZ, 1996, p.59-60.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; GOUVEIA NETO, C. G.; SILVA, J. M.; SILVA, I. F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, p.69-74, 2007.
- SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N., LOBATO, E. Avaliação dos métodos de determinação da necessidade de calcário em solo de cerrado. Planaltina: EMBRAPA, CT 27, 1998. 14p.
- TSEGAYE, T.; HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. **Soil Science**, v.163, p.143- 154, 1998.
- US DEPARTMENT OF THE ARMY. Army Corps of Engineers. Engineer Manual em 1110-2-1906. Washington, DC, Laboratory Soils Testing, 1970.
- VALENTIN, C., BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.55, p.225-245, 1992.
- VOGEL, H. J. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. **European Journal of Soil Science**, v.48, p.365–377, 1997.
- ZANINE, A. M.; SANTOS, E. M. Competição entre espécies de plantas – uma revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaiana, v.11, n.1, p.10-30, 2004.
- ZHAO, Y.; PETH, S.; KRUMMELBEIN, J.; HORN, R.; WANG, Z.; STEFFENS, M.; HOFFMANN, C.; PENG, X. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. **Ecological Modelling**, v.205, p.241-254, 2007.