

1 Aspectos mineralógicos e químicos relacionados à erodibilidade do solo

Os atributos mineralógicos e químicos do solo afetam a erodibilidade de maneira indireta, basicamente de duas formas: aqueles que estão relacionados à velocidade de infiltração ou permeabilidade, e aqueles que influem sobre a resistência do solo às forças de dispersão, agregação, salpico, abrasão e transporte pela energia cinética da chuva e da enxurrada (Smith e Wischmeier, 1962).

1.1 Óxidos

Uma série de trabalhos tem encontrado alta correlação dos óxidos de ferro, de alumínio e de silício com a erodibilidade. Um dos primeiros trabalhos desta natureza foi desenvolvido por Bennett (1926), para solos com alto teor de argila de regiões subtropicais e temperadas úmidas.

Middleton (1930) procurou determinar em laboratório quais propriedades físicas e químicas do solo se relacionavam com a erodibilidade, e, dentre estas, encontrou boa correlação para a razão sílica-sesquióxidos. Por meio de análise de regressão linear múltipla, Roth, Nelson e Römken (1974) desenvolveram um modelo para a estimativa da erodibilidade de subsolos argilosos.

Dentre as variáveis correlacionadas figuravam os teores de óxidos de ferro, de alumínio e de silício extraídos pelo ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB). Römken, Roth e Nelson (1977) simplificaram o modelo de Roth, Nelson e Römken (1974), considerando apenas os teores de óxidos de alumínio e de ferro extraíveis pela solução de DCB. O nomograma desenvolvido por Roth, Nelson e Römken (1974), embora contemple parâmetros importantes na agregação de solos, pode ser impróprio para latossolos, uma vez que os teores daqueles componentes nos solos geradores do modelo são muito inferiores aos encontrados nos solos tropicais (El-Swaify e Dangles, 1977).

Denardin (1990) desenvolveu um modelo para estimar o fator erodibilidade para solos do Brasil, e verificou existir um número muito pequeno de variáveis significativamente correlacionadas com o fator erodibilidade determinado no campo. No modelo desenvolvido para várias classes de solos ocorrentes no Brasil, conclusão do teor de óxidos de alumínio extraído pelo ataque sulfúrico, eleva o coeficiente de determinação de 0,84 para 0,87, melhorando sensivelmente a capacidade preditiva do mesmo. Roloff e Denardin (1994) separaram latossolos, podzólicos e Terra Roxa Estruturada, e desenvolveram um modelo específico para cada um destes solos. Entre as variáveis contempladas nos modelos estavam os óxidos de ferro extraídos pelo ataque sulfúrico.

1.2 Matéria orgânica

A matéria orgânica tem efeito na estruturação dos solos e formação dos agregados. A quantidade e qualidade da matéria orgânica presente no solo é que condiciona a melhoria das condições físicas (Stallings, 1957). Além deste aspecto, ela está relacionada com a atividade de muitos organismos que atuam na agregação do solo, reduzindo a erosão (Troeh, Hobbs e Danahue, 1980). Há, normalmente, um teor substancialmente maior em matéria orgânica nos primeiros centímetros do solo em relação aos centímetros seguintes. A matéria orgânica da superfície do solo ajuda sobremaneira a evitar a desagregação e o deslocamento de partículas, evitando assim uma erosão pronunciada (Resende, 1985). A matéria orgânica desempenha um

papel marcante na predição da erodibilidade. Uma série de autores desenvolveu modelos para predição da erodibilidade e encontraram altas correlações desta com os teores de matéria orgânica (Barnett et al. 1965; Lyle e Smerdon, 1965; Dumas 1965; Wischmeier e Mannering, 1969; Wischmeier, Johnson e Cross, 1971; Denardin 1990). A erodibilidade do solo tende a diminuir apreciavelmente com o aumento do teor de matéria orgânica. Contudo, em solos que apresentam elevada porcentagem de argila, pequenas variações no teor de matéria orgânica não influenciam na erodibilidade (Wischmeier e Mannering, 1969; Troeh, Hobbs e Danahue, 1980). Denardin (1990) desenvolveu um modelo para a predição da erodibilidade para solos do Brasil em um segundo modelo onde considera solos do Brasil e do EUA. No primeiro modelo, a matéria orgânica apresentou alta correlação com a erodibilidade, já no segundo houve alta correlação com a relação matéria orgânica da nova areia (0,1 - 2,0 mm).

1.3 pH em água e em KCL e Δ pH

O Δ pH representa a diferença entre pH em água e em KCL e corresponde ao sinal e magnitude de carga superficial do solo, de modo que valores de Δ pH pequenos geralmente indicam um solo dominado por minerais com carga variável. Por outro lado, Δ pH elevado indica apenas uma elevada densidade de carga superficial, sem contudo, especificar a presença de carga variável ou permanente (Uehara e Gillman, 1980). Angulo (1983) observou que a agregação do solo se correlacionou como o Δ pH, mostrando que a resistência dos agregados ao impacto da gota de chuva simulada diminui com a carga líquida.

2 Aspectos morfológicos e físicos relacionados à erodibilidade do solo

O comportamento da erodibilidade está relacionado diretamente com os atributos morfológicos e físicos do solo, que em última análise, são dependentes da constituição mineralógica, química e biológica do mesmo.

2.1 Cor

A cor do solo é um dos atributos morfológicos que pode ser utilizado para avaliação da erosão. Sendo de fácil avaliação, ela está relacionada com os atributos mineralógicos, físicos e químicos do solo, possibilitando inferências sobre o estado dos constituintes e condicionamento a que o solo esteja sujeito (Oliveira, Jacomine e Camargo, 1992). Assim, alguns autores têm associado a cor com o potencial erosivo do solo. Na Nigéria, Igue, Akamigbo e Mbagwu (1995) relacionam a cor do solo com classes de erodibilidade, entretanto, não foi possível encontrar relações significativas. Kreznor, Olson e Johnson (1992) desenvolveram um estudo objetivando estimar a erosão com base em atributos de fácil avaliação no campo para solos da região de Illinois no EUA, e entre os atributos usados, a cor expressa pelo croma e valor, possibilitou agrupar os solos segundo o potencial de perdas. Lima et al. (1990), trabalhando com latossolos da região de lavras (MG), concluíram que a cor avermelhada adquiria grande importância regional, por refletir parâmetros que conferem condição de maior resistência à erosão, como melhor expressão da estrutura granular e maior permeabilidade em comparação à cor amarelada.

2.2 Estrutura

Nos latossolos, as partículas primárias (argila, silte e areia) geralmente se encontram agrupadas, formando partículas maiores (agregados e/ou microagregados), conferindo-lhes uma estrutura granular estável (Resende et al. 1997). A estrutura desempenha um papel fundamental no estudo da erodibilidade do solo. Segundo Wischmeier, Johnson e Cross (1971), a estrutura granular, quando comparada com a estrutura maciça, laminar e em blocos,

apresenta um valor menor de erodibilidade. Já Resende et al. (1997) comentam que, em latossolos, estes pequenos grânulos, facilmente transportados pela água, se aproximam do formato de esfera e apresentam um mínimo de área exposta por unidade de volume, proporcionando baixa resistência, facilitando a ação da água e conseqüentemente o arraste. Por outro lado, um arranjo face a face, nos solos com estrutura tendendo a blocos, confere ao sistema uma maior coesão e menor permeabilidade (Resende, 1985; Resende et al. 1997).

Nos EUA, Wischmeier e Mannering (1969) estudaram as relações entre a erodibilidade e atributos do solo para 55 solos. Os autores encontraram uma relação entre o pH do solo e a estrutura, onde em solos com alto teor de silte, a erodibilidade aumenta como pH quando a estrutura é granular pequena e muito pequena; se a estrutura é granular, subangular ou angular de tamanho médio ou grande, a erodibilidade decresce com o aumento do pH. A estrutura do solo, codificada em função do tipo e tamanho, apresentou os coeficientes de correlação $r = 0,23$; $r = 0,01$ e $r = 0,05$, respectivamente, para a perda de solo, enxurrada e erodibilidade. Segundo Wischmeier, Johnson e Cross (1971), o grau de estrutura não afeta significativamente a erodibilidade, possivelmente devido à dificuldade do controle de umidade, no momento da avaliação e da apreciação subjetiva. Assim, baseado na descrição do perfil do solo, foram considerados apenas o tipo e tamanho dos elementos estruturais. Römken, Roth e Nelson (1977) encontraram coeficiente de correlação entre erodibilidade e estrutura do solo de $r = 0,33$. El-Swaify e Dangler (1977) encontraram coeficiente de $r = 0,266$, sendo que a estrutura granular está relacionada com os menores valores de erodibilidade e a estrutura em blocos com os maiores valores.

Denardin (1990) desenvolveu um modelo para estimar a erodibilidade de solos brasileiros e observou que a estrutura do solo, conforme preconizada por Wischmeier, Johnson e Cross (1971), foi a variável independente que apresentou baixa correlação com a erodibilidade ($r = - 0,0226$). Marques (1996) estudou a erodibilidade de 23 solos com Bt no Brasil, e, segundo o autor, entre os componentes caracterizadores da estrutura do solo ou combinações deles, o tamanho foi o que apresentou melhor correlação ($r = 0,73$) com a erodibilidade, sendo que os solos com estrutura cujo tamanho foi classificado como grande correlacionaram-se com a classe de erodibilidade alta. Silva et al. (1994/1995) estudaram a erodibilidade e o salpico em Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Vermelho-Amarelo da região dos cerrados, e verificaram que o solo com unidade estrutural menor (Latossolo Vermelho-Escuro), embora apresentasse maior quantidade de solo salpicado, possuía menor erodibilidade. As partículas que formam agregados grandes, quando são expostas ao impacto das gotas de chuva, são cisalhadas com maior facilidade, e os agregados menores são deslocados mais facilmente, alojando-se entre as unidades maiores, o que leva a um rápido selamento superficial e, conseqüentemente, à maior erosão (Le Bissonnais, Bruand e Jamagne, 1989; Roth e Eggert, 1994).

2.3 Consistência

A consistência refere-se às manifestações apresentadas pelo material constitutivo do solo, resultantes das forças de adesão e coesão, segundo sua ação variável nos diversos estados de umidade em que se encontra o material do solo (Oliveira, Jacomine e Camargo, 1992; Lemos e Santos, 1996). Resende (1985) procurou fazer um paralelo entre organização microscópica das partículas de argila e em que condições ocorrem, e seu efeito na consistência do solo. As partículas bem organizadas apresentam um aumento de coesão e adesão, já as mal organizadas apresentam redução. No primeiro caso, os agentes responsáveis estão relacionados a solos com argilas silicatadas com alta superfície específica, e as condições que ocorrem com frequência são em solos desferrificados, pobres em matéria orgânica e menos intemperizados. O efeito na consistência está relacionado ao aumento da dureza, quando seco, e plasticidade e pegajosidade, quando molhado. O segundo caso está relacionado à

presença de altos teores de óxidos de ferro e de alumínio e argilas com baixa superfície específica (caulinita), ocorrendo com frequência em solos de natureza latossólica e com altos teores de matéria orgânica e cátions trocáveis (cálcio). O efeito na consistência neste caso é o aumento da friabilidade.

A consistência do solo pode ser determinada tanto a nível de campo como em laboratório, sendo que neste último, o grau de subjetividade é menor. Segundo Bryan, Govers e Poesen (1989), o grau de coesão do solo é um importante atributo para se avaliar a erosão hídrica. Folly (1995) estudou a erodibilidade de 20 solos representativos da Ghana, na África, os quais foram enquadrados como alta, não sendo identificada uma relação com o grau de coesão, expresso pelo limite de liquidez e consistência. De Ploey e Múcher (1981) estudaram o processo erosivo, em solos da Bélgica, através do índice de consistência, e foi possível inferir sobre a suscetibilidade do solo ao encrostamento. Segundo Igwe, Akamigbo e Mbagwu (1995), a correlação entre erodibilidade e o limite de plasticidade foi negativa ($r = -0,42$), e para o limite de liquidez e índice de plasticidade as correlações foram positivas ($r \leq 0,24$) e não significativas. Os resultados observados entre erodibilidade e limite de plasticidade sugeriram que solos com baixo limite de plasticidade são mais suscetíveis à erosão, e estes resultados foram confirmados através de observações de campo.

2.4 Permeabilidade do solo à água

A permeabilidade é outro fator que tem sido estudado em relação à erodibilidade do solo. Os latossolos mais permeáveis estão nas classes de permeabilidade muito rápida, isto é, possuem taxas de infiltração maiores do que 250 mm h^{-1} (Resende, 1985). O Neal (1952) desenvolveu uma chave para avaliação da permeabilidade do solo no campo, visando dar suporte aos estudos de erosão hídrica. No Brasil, Lemos e Santos (1996) propuseram 8 classes de drenagem do perfil do solo. Baseado no estudo de O Neal (1952), Wischmeier, Johnson e Cross (1971) codificaram a permeabilidade em seis classes, objetivando estimar a erodibilidade de maneira indireta. Utilizando-se das classes propostas por Wischmeier, Johnson e Cross (1971), outros autores desenvolveram modelos para estimativa indireta da erodibilidade (El-Swaify e Dangler 1977; Denardin, 1990). Segundo Roloff e Dernadin (1994), o uso da permeabilidade conforme sugerido Wischmeier, Johnson e Cross (1971) deve ser utilizado com critério, caso contrário pode trazer problemas com relação à inferência dos seus códigos.

2.5 Granulometria

A distribuição do tamanho de partículas é um dos atributos do Solo que mais estudos tem do seu efeito na erodibilidade. A erodibilidade tende a aumentar com o incremento do conteúdo de silte mais areia muito fina e a diminuir com o aumento dos conteúdos de areia com diâmetro maior que 0,1 mm e argila (Wischmeier, Johnson e Cross, 1971). Segundo Wischmeier e Mannering (1969), a análise da relação da erodibilidade com a textura do solo mostra que, geralmente, os solos se tornam menos suscetíveis à erosão quando decresce o teor de silte, no entanto, as porcentagens de silte, areia e argila devem ser consideradas em relação a níveis de outros atributos do solo. Segundo os mesmos autores, a fração areia muito fina (0,05 a 0,10 mm) parece se comportar mais como silte do que como outras partículas de areia.

As partículas do solo não são igualmente deslocadas pelas águas da chuva no processo erosivo. As partículas menores, vencida a força que as une, são facilmente transportadas, e as partículas maiores resistem mais à remoção tendendo a se acumular na superfície do solo (Resende, 1985). As frações silte e areia muito fina desempenham um papel muito importante no encrostamento, sendo de se prever que solos mais ricos em silte apresentam uma tendência mais acentuada ao encrostamento (Resende et al. 1997). Esta tendência ao encrostamento foi verificada também em latossolos que, por definição, são pobres em silte.

Tal fenômeno é atribuído às argilas flocculadas, que podem permanecer no tamanho das frações silte e areia muito fina (Resende, 1985; Lima et al. 1990; Ferreira 1992; Resende et al 1997).

Os teores de silte e areia muito fina obtidos da análise granulométrica com dispersão total de (NaOH) estão entre os principais parâmetros responsáveis pela erodibilidade dos solos. Sendo os latossolos, via de regra, pobres em silte, os índices de erodibilidade, que consideram tais parâmetros relevantes, apresentam para os mesmos acentuadas resistência à erosão. Entretanto, quando a dispersão do material é realizada somente com água, os agregados, de elevada estabilidade nesses solos, podem permanecer no tamanho das frações silte e areia muito fina, permitindo dúvidas sobre a aplicabilidade dos resultados de granulometria com dispersão total na predição do seu comportamento diante da erosão. O emprego das frações granulométricas dispersas em água apresentam valores mais elevados para a erodibilidade, quando comparados àqueles obtidos de maneira convencional (nomograma de Wischmeier, Johnson e Cross, 1971), notadamente no horizonte **B** cujas unidades estruturais são menores e mais estáveis (Lima et al. 1990).

Segundo Wischmeier e Mannering (1969), em solos com alto conteúdo de argila, com 4% de matéria orgânica, por exemplo, a correlação negativa da erodibilidade com o índice de agregação parece se manter até que a fração arenosa exceda 35%. Para 2% de matéria orgânica, esse nível crítico cai para 10%.

Angulo (1983) estudou correlações entre a erodibilidade e a atributos texturais e pôde concluir que, de modo geral, os coeficientes não foram significativos. A causa dessas baixas significâncias se deve ao comportamento diferencial dos solos argilosos frente à erodibilidade, particularmente os de textura muito argilosa. Segundo o mesmo autor, o silte e a areia (< 0,5 mm) são as frações que mais favorecem a erosão do solo, enquanto que a areia maior que 0,5 mm não teria este comportamento devido à maior massa das partículas. Resultados semelhantes foram encontrados para solos da Nigéria por Obi (1982) e Igue, Akamigbo e Mbasgwu (1995). El-Swaify e Dangler (1977), trabalhando com alguns solos do Havaí, encontraram correlação inversa entre erodibilidade e teores de argila ($r = -0,649$) e direta como os teores de silte ($r = 0,581$), silte mais areia muito fina ($r = 0,603$), areia total ($r = 0,560$) e areia maior que 0,1 mm ($r = 0,514$). Römken, Roth e Nelson (1977) trabalharam com sete solos da região central dos EUA e encontraram correlações positivas da erodibilidade com a argila e o silte; já para as frações de areia total e sub frações desta, a correlação foi negativa.

2.6 Estabilidade de agregados

A agregação do solo é um dos atributos mais importantes a ser considerado quando se investiga o comportamento do mesmo em relação à erosão. Angulo (1983), estudando a relação entre a erodibilidade e alguns atributos do solo, concluiu que a agregação do solo, estimada através da estabilidade dos agregados em água, e a resistência ao impacto da gota foram as características, dentre as estudadas, que melhor se correlacionaram com a erodibilidade do solo. Segundo Le Bissonnais (1996), através do estudo de estabilidade de agregados é possível inferir sobre o encrostamento e a erodibilidade do solo. Segundo o mesmo autor, os solos podem ser separados em cinco classes de estabilidade, encrostamento e erodibilidade de acordo com o diâmetro médio geométrico, sendo que os solos com diâmetro médio geométrico maior que 2 mm foram classificados como muito estáveis, que não encroscam e que são resistentes à erosão.

Estudando perdas de solo obtidas através de chuva simulada, El-Swaify e Dangles (1977) puderam concluir que o melhor coeficiente de correlação significativo encontrado foi entre a erodibilidade e os agregados menores que 0,25 mm, chamados de instáveis pelos autores ($r = 0,903$), seguidos do diâmetro médio geométrico ($r = -0,768$). Falayi e Lal (1979) estudaram a relação entre o tamanho dos agregados e a erodibilidade em solos da Nigéria e

observaram que os agregados de 10 a 50 mm são os mais favoráveis para o controle da erosão, e que agregados menores que 2 mm favorecem a erosão. Os coeficientes de correlação mais altos entre a erodibilidade e formas de expressar a estabilidade de agregados foram verificados para o diâmetro médio ponderado e agregados maiores que 1 mm. Wischmeier e Mannering (1969) encontraram coeficientes de correlação na ordem de $r = -0,24$ (não significativo), entre a erodibilidade e o índice de agregação. Egashira, Kaetsu e Takuma (1983) trabalharam com 18 solos do Japão, todos pertencentes a ordem dos andissolos e encontraram coeficientes de correlação significativos entre erodibilidade e estabilidade de agregados expressa na forma de agregados estáveis maiores que 53 mm ($r = -0,956$, $P < 0,01$). Segundo os mesmos autores, estes atributos podem ser utilizados como índice de erodibilidade para os solos estudados.

Páez e Ildefonso (1992) avaliaram a eficiência de índices de erodibilidade de 17 solos da Venezuela. Os solos foram classificados em dois grupos de resistência à erosão, ou seja, baixa ($< 0,006 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) e muito baixa ($0,006 \text{ a } 0,013 \text{ t h M MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), que corresponderam aos valores de agregados estáveis menores que 0,25 mm de 250 a 100 g kg^{-1} e menores que 100 g kg^{-1} ; e o diâmetro médio ponderado de 1,6 a 2,0 mm e menor que 2,0 mm, respectivamente. Yamamoto e Anderson (1973) estudaram as relações entre salpico e a erodibilidade de 32 solos do Havaí. A taxa de salpico apresentou correlação significativa com a porcentagem de agregados estáveis entre 0,25 a 0,50 mm; houve relação entre diâmetro médio geométrico e agregados estáveis menores que 0,25 mm.

Segundo Folly (1995), a erodibilidade foi estimada com base em três atributos físicos, a saber: resistência a penetração, estabilidade de agregados e índice de consistência. Através da estabilidade de agregados e índice de consistência foi possível concluir que os solos estudados apresentaram suscetibilidade ao lencrostamento e alta erodibilidade.

Objetivando identificar a dinâmica de atributos do solo relacionados à erodibilidade, Obi, Salaka e Lal (1989) consideraram atributos como a densidade do solo, afetando a porosidade e conseqüentemente a condutividade hidráulica do solo. Laskar e Govindarajan (1980) avaliaram a erodibilidade dos solos de tripura na Índia, onde a taxa de erosão apresentou uma correlação significativa com as taxas de dispersão ($r = 0,9662$), de infiltração de água ($r = 0,8987$) e argila/umidade equivalente ($r = 0,5804$). Segundo os autores, estes parâmetros foram considerados como bons critérios para prever a erodibilidade dos referidos solos.

Referencia:

SILVA, M.L.N. Erosividade da chuva e proposição de modelos para estimar a erodibilidade de Latossolos Brasileiros. Tese de Doutorado. Lavras: UFLA, 1997, 154p.