

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS EROSIVOS

O termo erosão provém do latim “*erodere*” e significa “corroer”. Nos estudos ligados às ciências da terra, o termo é aplicado aos processos de desgaste da superfície terrestre (solo ou rocha) pela acção da água, do vento, do gelo e de organismos vivos (plantas e animais), além da acção do homem.

A erosão consiste no processo de desagregação e arrastamento das partículas de solo causado pela acção da água e do vento, constituindo a principal causa da degradação dos solos e sua subsequente utilização. Quanto ao tipo de agente causador, a erosão pode ser classificada em eólica ou hídrica. Na erosão eólica, o agente responsável pelo processo erosivo é o vento, enquanto na erosão hídrica é a água.

A erosão hídrica apresenta maior interesse, por ser a de ocorrência mais frequente e a que causa maiores danos, provocando prejuízos não só no sector agrícola, como também em outras actividades económicas e no próprio meio ambiente, uma vez que, para a formação de um centímetro de solo, são necessários de 120 a 400 anos (HUDSON, 1981).

Segundo BARROSO & SILVA (1992), o processo erosivo também causa problemas em cursos e reservatórios de água, podendo-se destacar: redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios devido à sedimentação de material transportado; redução do potencial de geração de energia eléctrica; elevação dos custos de tratamento da água; desequilíbrio no balanço de oxigénio dissolvido na água, proporcionando prejuízos para o crescimento de espécies aquáticas; e o aumento dos custos de dragagem dos cursos e dos reservatórios de água.

Os processos hidrológicos afectam a erosão do solo, o transporte de sedimentos erodidos, a deposição de sedimentos e as características físicas, químicas e biológicas, que no seu conjunto determinam a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Os sedimentos são provavelmente, o mais significativo de todos os poluentes em termos de concentração na água, impactos no uso da água e efeitos no transporte de outros poluentes (BROOKS *et al.*, 1991).

O desprendimento e arraste das partículas do solo ocorrem quando há ruptura do equilíbrio natural existente no solo, e as forças advindas de factores climáticos, como a chuva e o vento, passando a ser suficientes para desequilibrar esse sistema.

Associadas a outros factores relativos às condições do terreno sobre o qual a chuva incide, essas forças determinam a intensidade do processo erosivo. Entre os factores relacionados com as condições do terreno, que interferem no processo erosivo, salientam-se o declive, a capacidade de infiltração da água no solo, a distância percorrida pelo escoamento superficial, a rugosidade da superfície do terreno, a resistência do solo à acção erosiva da água e a percentagem de cobertura do solo existente à época da ocorrência da chuva.

A erosão hídrica, causada pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial, envolve os processos de extracção, transporte e deposição das partículas do solo, e a sua intensidade depende de inúmeros factores. Desta forma, um modelo de erosão deve considerar a influência de todos os parâmetros envolvidos no processo.

O processo erosivo depende de factores externos como o potencial de erosividade da chuva, as condições de infiltração e escoamento superficial, o declive e o comprimento da encosta, e ainda de factores internos, como gradiente crítico, desagregabilidade e erodibilidade do solo. A erosão ao longo do tempo depende de factores tais como características geológicas e geomorfológicas do local, presença de trincas de origem tectónica e evolução físico-química e mineralógica do solo (LIMA, 2003; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2002 e CAMAPUM DE CARVALHO, 2005).

Devido ao elevado número de variáveis que interferem na erodibilidade dos solos é difícil a sua correlação com propriedades e parâmetros geotécnicos isolados (FÁCIO, 1991).

2.1.1 Processo de ocorrência da erosão hídrica

A erosão hídrica dos solos e a consequente produção de sedimentos tem sido objecto de preocupação crescente por parte dos responsáveis pela gestão do uso do solo e dos recursos hídricos.

A água é caracterizada como principal agente detonador dos movimentos gravitacionais de massa. A sua acção poder ser feita através da elevação do grau de saturação dos solos, diminuindo a resistência destes, especialmente as relacionadas com as tensões capilares e as ligações por cimentos solúveis ou sensíveis à saturação. O aumento do peso específico do solo devido à retenção de parte da água infiltrada é outra condicionante de instabilização que incide nas vertentes (IPT, 1991).

De acordo com GUERRA (1999) “A acção do ‘splash’ é a etapa inicial do processo erosivo, pois prepara as partículas que compõem o solo, para serem transportadas pelo escoamento superficial”, também conhecido por erosão por salpicamento (GUERRA & GUERRA, 1997). Trabalhos experimentais têm demonstrado o significado da acção morfogenética da gota de chuva, responsável pela desagregação do material, sobretudo quando a superfície da vertente se encontra desprotegida. CARSON & KIRKBY (1972) citam deslocamento de partículas desde curtas distâncias, da ordem de alguns milímetros, até maiores distâncias, podendo atingir um raio de 10 centímetros em relação ao ponto de impacto. Da mesma forma, o ‘splash’ move directamente detritos com aproximadamente 10 mm de diâmetro, e indirectamente pode deslocar fragmentos de maiores dimensões.

GUERRA (1999) chama ainda a atenção para a formação de crostas superficiais que provocam a selagem dos solos: “O papel do ‘splash’ varia não só com a resistência do solo ao impacto das gotas de água, mas também com a própria energia cinética das mesmas. Dependendo da energia aplicada sobre o solo, vai ocorrer, com maior ou menor facilidade, a ruptura dos agregados, formando as crostas que provocam a selagem dos solos”. Estas crostas superficiais podem apresentar uma espessura de 0.1 a 3.0 mm (FARRES, 1978), que pode implicar redução da capacidade de infiltração superior a 50 %, dependendo das características do solo (MORIN *et al.*, 1981).

O processo associado à erosão hídrica pode ser descrito da seguinte forma: com o início da chuva, parte do volume precipitado é interceptado pela vegetação e parte atinge a superfície do solo, provocando o humedecimento dos agregados do solo e reduzindo as suas forças coesivas. Com a continuidade da acção da chuva, pode ocorrer a desintegração dos agregados, com consequente desprendimento de partículas menores. A quantidade de solo não estruturado aumenta com a intensidade da precipitação, a velocidade e o tamanho das gotas de chuva.

Além de ocasionar a libertação de partículas que obstruem os poros do solo, o impacto das gotas tende, também, a compactá-lo, ocasionando a selagem da sua superfície e, consequentemente, reduzindo a capacidade de infiltração da água no solo. O depósito da água nas depressões da superfície do solo começa a ocorrer somente quando a intensidade de precipitação excede à velocidade de infiltração ou quando a capacidade de acumulação de água no solo for excedida. Esgotada a capacidade de retenção superficial, a água começa a escoar. Associado ao

escoamento superficial ocorre o transporte de partículas do solo, as quais podem sofrer deposição quando a velocidade do escoamento superficial for reduzida (PRUSKI, 1997).

Juntamente com as partículas de solo em suspensão, o escoamento superficial transporta nutrientes, matéria orgânica, sementes, correctivos, fertilizantes e pesticidas que, além de causarem prejuízos directos à produção agrícola, causam a poluição dos recursos hídricos. Assim, as perdas por erosão tendem a elevar os custos dos factores de produção, devido à necessidade de aumentar o uso de correctivos e fertilizantes e da redução no rendimento operacional das máquinas agrícolas.

As perdas de solo associadas à erosão hídrica são, normalmente, descritas a partir da combinação de dois processos que regem o desprendimento de partículas de solo pela acção da água: a erosão entre sulcos e a erosão no sulco (FOSTER *et al.*, 1977; MEYER *et al.*, 1975).

A erosão entre sulcos decorre do desprendimento das partículas do solo pelo impacto das gotas de chuva, enquanto a erosão no sulco provém da libertação das partículas do solo em virtude da concentração do escoamento superficial (KING *et al.*, 1995).

O processo de escoamento superficial da água sobre o terreno ocorre tanto sob a forma laminar como de forma concentrada, em pequenos sulcos, sendo a vazão em cada sulco função da área de contribuição de escoamento para ele e do micro relevo do terreno. A vazão de cada sulco afecta a erosão que ocorre neste e o transporte de sedimentos (GILLEY *et al.*, 1990).

A erosão entre sulcos, também designada como erosão laminar, forma-se a partir da libertação de partículas de solo tanto pelas gotas de chuva como pelo escoamento superficial. Esse tipo de erosão é considerado o que mais causa prejuízos à agricultura, de difícil identificação numa fase inicial por não deixar sinais de fácil percepção visual. Assim, na erosão entre sulcos, os mecanismos relacionados com a libertação de partículas de solo pelo impacto das gotas da chuva na superfície do solo e pelo escoamento superficial, são responsáveis pelo desprendimento e transporte de sedimentos (FOSTER, 1982).

Segundo FOSTER (1982), a concentração do escoamento superficial produzido por uma chuva ocasiona a formação de pequenos canais, o que resulta na erosão em sulcos, constituindo uma etapa mais avançada da erosão laminar, que

pode ser facilmente controlada pelas práticas culturais. Numa encosta, ela começa em posições situadas mais a jusante, no entanto, pelo seu próprio processo de formação, deixa marcas visíveis no terreno de fácil identificação.

A erosão em sulcos é caracterizada pela formação de canais com uma profundidade máxima de 300 mm, podendo ser subdividida quanto à profundidade dos sulcos, em razão do grau de dificuldade que os sulcos oferecem ao movimento das máquinas agrícolas, e quanto à frequência de ocorrência dos sulcos, em virtude da distância entre estes.

Nas áreas de ocorrência da erosão em sulcos predomina a acção erosiva decorrente da energia associada ao escoamento, sendo a energia do impacto das gotas da chuva no desprendimento de partículas usualmente considerada desprezível. Além de promover o desprendimento de partículas de solo, o escoamento concentrado no sulco é também o principal agente de transporte dos sedimentos libertados (ALMEIDA, 1981).

A desagregação do solo nos sulcos ocorre quando a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento é maior do que a resistência ao cisalhamento do solo. Quando a força cisalhante exceder a resistência crítica ao cisalhamento e quando a carga de sedimentos transportada for menor que a capacidade de transporte do escoamento, ocorrerá a libertação de solo nos sulcos. O desprendimento de partículas de solo no sulco é considerado nulo quando a força de cisalhamento for menor do que a resistência crítica do solo (TISCARENO-LOPEZ *et al.*, 1993).

BRADFORD *et al.* (1987) estudaram a importância relativa dos mecanismos decorrentes do impacto das gotas da chuva na superfície do solo e do escoamento superficial no processo de erosão entre sulcos. Eles concluíram que o desprendimento das partículas de solo é ocasionado principalmente pela energia de impacto das gotas da chuva, e a força cisalhante do escoamento superficial é o principal agente de transporte, estes processos são interdependentes. Tais conclusões também foram obtidas anteriormente por outros autores, entre eles FOSTER (1982) e GILLEY *et al.* (1985).

Apesar da inter-relação entre a acção erosiva do impacto das gotas da chuva e do escoamento superficial, os papéis impostos por cada um dos agentes erosivos, seja em áreas entre sulcos ou em sulcos, são muitos distintos. As equações disponíveis para previsão do arrastamento das partículas de solo sejam elas

desenvolvidas para avaliar o efeito do escoamento superficial ou para o impacto das gotas da chuva, não leva em consideração a inter-relação entre os agentes erosivos.

O estudo da erosão pode ser abordado por duas formas ou métodos de investigação distintos: a erosão actual existente em determinado lugar e que pode ser medida ou cartografada, e a erosão potencial ou a erosão prevista para determinado local em termos futuros.

2.1.2 Factores que intervêm no processo erosivo decorrente do escoamento superficial

A precipitação é o factor climático de maior importância na erosão hídrica do solo, devido à acção erosiva exercida pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial produzido. Os solos, em geral, possuem uma grande variabilidade espacial das suas propriedades químicas, físicas e morfológicas.

Assim, é esperado que o seu comportamento em relação ao processo erosivo seja bastante diferenciado. Quanto menor a estabilidade dos agregados e a capacidade de infiltração da água no solo, maior será a susceptibilidade do solo à erosão. Solos ricos em limo e areia e pobres em matéria orgânica encontram-se mais predispostos ao processo erosivo, devido à pequena resistência que oferecem ao desprendimento de partículas durante a precipitação.

A baixa capacidade de infiltração da água num solo torna-o mais propenso ao escoamento superficial e, conseqüentemente, ao transporte dos sedimentos. Além disso, quanto mais íngreme e longa for a encosta, tanto maior será a concentração do escoamento superficial e, por consequência, maiores serão a velocidade e a vazão correspondentes, o que aumentará a capacidade de transporte de sedimentos (PRUSKI, 1998).

Segundo COGO *et al.* (1996), a erosão do solo depende das características da chuva, do escoamento superficial e das condições da superfície do terreno. As características da chuva são determinantes na erosão laminar, enquanto as condições do escoamento o são na erosão que ocorre nos sulcos.

Outros autores, como LATTANZI *et al.* (1974), MEYER & HARMON (1989), MEYER (1981), PARK *et al.* (1983), BRADFORD *et al.* (1987) e GHIDEY & ALBERTS (1994), têm referido que a intensidade da chuva, a infiltração da água no solo, o

escoamento superficial, o declive e cobertura do solo são os factores que mais afectam a erosão laminar.

O processo de erosão em sulcos é também influenciado pelas condições da superfície do solo, como a existência de vegetação ou resíduos vegetais, o declive e as condições de rugosidade, que reduzem a velocidade e o volume de escoamento, diminuindo a capacidade de transporte de sedimentos. O escoamento superficial concentra-se em função das irregularidades do terreno (linhas de cultura, sulcos de sementeira, micro relevo do terreno e barreiras vegetais) e de diferenças na densidade e erodibilidade do solo (MEYER *et al.*, 1975).

O aumento da percentagem de cobertura do solo, independentemente do tipo do resíduo utilizado, proporciona diminuição da velocidade de escoamento superficial da água e, conseqüentemente, da percentagem de sedimentos transportados. Isto deve-se ao facto de que o resíduo cultural, presente sobre a superfície do solo, serve como barreira física, retendo sedimentos de maior tamanho que, de outra forma, seriam transportados pelo escoamento superficial (LOPES *et al.*, 1987).

Os resíduos vegetais incorporados no solo podem proporcionar, por efeitos directos e indirectos, redução da erosão em sulcos. VAN LIEW & SAXTON (1983) verificaram que o efeito desses resíduos sobre a desagregação do solo nos sulcos é devida à redução da tensão cisalhante do escoamento actuante sobre o solo, à formação de locais de deposição de partículas suspensas e, a longo prazo, à melhoria da agregação do solo.

MEYER *et al.* (1983) conduziram uma série de ensaios para avaliar as perdas de solo ao longo do sulco em uma linha de cultura. Foram realizadas dez combinações com quatro declives diferentes e quatro vazões, sendo os testes conduzidos em duas condições: precipitação de 122 mm/h e sem precipitação.

A vazão na entrada do sulco foi reduzida à medida que se iniciou a precipitação, nas mesmas proporções, de forma que a saída do escoamento estivesse igual à vazão obtida no teste sem a precipitação. Esses autores concluíram que o transporte de sedimentos no sulco foi um factor muito influenciado pelo declive. Com a elevação do declive, houve aumento na capacidade de transporte de sedimentos no sulco. Apesar de ter ocorrido em menor escala, a vazão também afectou a capacidade de transporte de sedimentos.

LATTANZI *et al.* (1974) verificaram que, quando o declive aumentou de 2 para 20%, a erosão entre sulcos de um solo limoso cresceu mais do que o dobro. WATSON & LAFLEN (1986) afirmaram que o aumento do declive da superfície do solo também aumenta a erosão nas áreas entre sulcos, embora isso não aconteça na mesma proporção que ocorre na erosão em sulcos. Esta conclusão foi também obtida por outros investigadores, entre os quais ZINGG (1940), SMITH & WISCHMEIER (1957), VAN LIEW & SAXTON (1983) e HAHN *et al.* (1985).

A susceptibilidade do solo à erosão em sulcos também é muito afectada pelas operações culturais do solo. A preparação do solo aumenta a erodibilidade e reduz a tensão crítica de cisalhamento do solo. FOSTER (1982) verificou que a erosão em sulcos, num solo preparado recentemente, foi de 3 a 15 vezes superior àquela que ocorria num solo preparado há um ano.

2.1.3 Erodibilidade do solo

A susceptibilidade de um solo ao processo erosivo é expressa quantitativamente pela sua erodibilidade (WISCHMEIER & SMITH, 1962). Essa propriedade do solo representa o efeito integrado dos processos regulando o comportamento do solo diante dos agentes erosivos (LAL, 1988). Nos modelos de previsão da erosão, a erodibilidade do solo é geralmente representada por um factor que expressa a perda de solo por unidade de erosividade da chuva para um solo característico (WISCHMEIER & SMITH, 1958).

Inúmeros índices baseados em parâmetros do solo determinados em análises laboratoriais de rotina têm sido utilizados para avaliar a susceptibilidade relativa dos solos à erosão. A maioria desses índices expressa a resistência do solo à desagregação, envolvendo propriedades que influenciam os processos de agregação e estabilidade dos agregados, retenção e transmissão da água e resistência ao impacto das gotas de chuva. Tais índices representam uma medida relativa da desagregação de um solo e podem não reflectir, em condições naturais, o seu comportamento em resposta aos agentes erosivos e ao seu manejo (BRYAN, 1968; LAL, 1988).

O impacto da chuva num solo cultivado, recentemente, causa desarranjo dos agregados da superfície. Este desarranjo pode provocar a selagem superficial (DULEY, 1939 e FARRES, 1978), afectando a infiltração da água (DULEY, 1939 e

HILLEL & GARDNER, 1970) e o desprendimento e arraste das partículas do solo (FRANCIS & CRUSE, 1983). A estabilidade dos agregados do solo é, provavelmente, a propriedade que mais influencia a erodibilidade do solo (BRYAN, 1968). Então as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microbiológicas do solo que determinam a estabilidade dos agregados também influenciam a erodibilidade do solo.

GHEBREIYESSUS *et al.*, (1994), ao analisar a influência da densidade do solo na predisposição à erosão de um solo argilo limoso, verificaram que a resistência à desagregação do solo foi 4.7 vezes maior para um solo com massa específica de 1.4 g/cm³, em comparação a um solo com massa específica de 1.2 g/cm³.

O modelo desenvolvido por WISCHMEIER & MANNERING (1969) para estimar o factor de erodibilidade do solo considera 24 variáveis independentes. Entre os parâmetros do solo que contribuíram com maior expressão para o ajuste do modelo, destacam-se: granulometria, pH, conteúdo de matéria orgânica, índices de agregação e estrutura. A equação é válida para uma grande diversidade de solos de textura média, porém, além de ser um modelo complexo, algumas variáveis, nas quais a equação está fundamentada, não são válidas quando a fracção de areia excede os 65%, ou quando a fracção de argila for superior a 35%.

2.2. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

Um modelo hidrológico requer uma vasta quantidade de informação para representar as características físicas e hidrológicas de uma bacia hidrográfica. No entanto, se o modelo tiver em conta a variabilidade espacial dos processos como a infiltração, a evaporação e as características fisiográficas da bacia, a quantidade de informação requerida aumenta significativamente, pois cada unidade hidrológica será caracterizada pela sua topografia, geologia, tipo e uso de solo e clima.

Se considerarmos também que o modelo deve satisfazer um objectivo bem definido, por exemplo conhecer a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica a diferentes cenários de uso do solo, a quantidade de informação a manipular aumentará com o número de alternativas a estudar. É provável, que a escassez de fontes de informação limite o desenvolvimento e utilização deste tipo de modelos.

2.2.1 Bacias Hidrográficas

A bacia hidrográfica ou bacia de drenagem é uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal de escoamento. O limite de uma bacia hidrográfica é conhecido como divisor de drenagem ou divisor de águas (COELHO NETO, 1994).

Segundo TUCCI (2001), a bacia hidrográfica pode ser definida como um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado através da secção de descarga, considerando-se como perdas intermédias os volumes evaporados, transpirados e infiltrados profundamente (TUCCI, 2001).

As dimensões das bacias hidrográficas variam desde milhões de quilómetros até poucos metros quadrados, podendo drenar para um canal ou para um eixo de vale não canalizado. Bacias principais drenam em direcção a um canal, tronco ou colector principal, constituindo um sistema de drenagem hierarquicamente organizado (COELHO NETO, 1994).

O conceito de bacia hidrográfica representa uma boa e relevante demarcação na paisagem para o planeamento de uso do solo, não é uma ideia original, pois já era reconhecida por muitos conservacionistas como John Powel e Clarence King, e utilizada na China antiga para o planeamento urbano (GRANT, 1994). A bacia hidrográfica constitui uma unidade hidrológica natural, sendo a mais lógica para o planeamento dos recursos hídricos, permite que o foco das atenções se concentre nestes recursos, e se tenha uma visão de conjunto dos problemas que os afectam (KURTZ *et al.*, 2003), principalmente nas actuais situações de grande pressão sobre o ambiente em função do crescimento e desenvolvimento populacional.

Cada vez mais se observa a especialização dos estudos, segundo a tipologia dos processos erosivos e locais de ocorrência, o que conduz a se proporem métodos de diagnóstico específico. Para os espaços rurais, os diagnósticos tendem a ser realizados com recurso a métodos que visem estabelecer a capacidade de uso e indicar a utilização e gestão mais adequadas, além das orientações pertinentes à estrutura fundiária, rede viária e outras formas de intervenção humana.

A delimitação territorial de uma bacia hidrográfica envolve diversos estudos, entre os quais se podem realçar os cartográficos e de uso e ocupação do solo. Os

limites naturais tornam-se dinâmicos e flexíveis e a bacia passa a constituir um espaço de vivência, de conflitos e de organização de novas relações sociais.

Esta conceptualização aponta para a imperiosa necessidade de se reconsiderar a bacia hidrográfica, ampliando o seu conceito aplicado aos estudos geomorfológicos, hidrológicos e de engenharia. Trata-se de compreendê-la como unidade físico - territorial de planeamento e gestão, de modo abrangente.

As bacias hidrográficas podem ser divididas num determinado número de sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerado ao longo do canal de escoamento.

A vantagem de utilizar a sub-bacia hidrográfica é defendida por vários autores como BELTRAME (1994), GRANT (1994), KURTZ (2000), MATA (1981), MELLO FILHO (1994), MORAIS (1994), ODUM (1988), ROCHA (1991) e ROCHA & KURTZ (2001) entre outros, por serem áreas onde se pode observar o impacto ambiental causado pela sociedade.

A sub-bacia hidrográfica é a área que drena a água das chuvas por ravinas, canais e tributários para um curso de água principal (ROCHA, 1997).

2.2.2 Utilização dos Sistemas de Informação Geográfica

No passado, alguns países em desenvolvimento promoviam estudos, classificações e atribuição de prioridades de actividades em bacias hidrográficas, promovendo investigações de campo e manipulações manuais de mapas, procedimentos que acarretavam grandes gastos de tempo e custos (ASSIS, 1995).

Nos últimos tempos o conhecimento adquirido das técnicas de geoprocessoamento ou Sistemas de Informações Geográfica (SIG) tem sido um grande aliado do meio ambiente, principalmente na monitorização, conservação e exploração de bacias hidrográficas.

A utilização do SIG e informatização podem reduzir significativamente o tempo e o custo destas actividades (CALIJURI, 1996), além de fornecer resultados mais precisos e permitir ainda manipulações teóricas da realidade, isto é, simulações da alteração de um ou mais factores que compõem a paisagem alvo de estudo, e prever o acontecimento ou não de algum tipo de impacto ambiental.

A utilização do SIG surge como uma ferramenta ampla e complexa de análise, que permite várias possibilidades, tanto no que se refere ao planeamento da organização sócio - espacial da bacia hidrográfica, quanto aos aspectos dos recursos hídricos, permitindo que sejam sobrepostas e sintetizadas de forma integrada, actualizadas constantemente de maneira dinâmica, não limitando o número de variáveis neste processo, ou seja, é um sistema aberto e multifuncional, embora esteja com a sua abrangência temática voltada para a gestão dos recursos hídricos. Além disso, proporciona a integração dos dados espaciais da bacia e um modelo para a gestão dos recursos hídricos (SILVA, 2006).

Para representar as características físicas e hidrológicas de uma bacia, um modelo hidrológico requer uma vasta informação, nomeadamente se o modelo for do tipo distribuído. Para se acoplar o SIG a um modelo hidrológico é necessário efectuar os seguintes passos (FERNANDEZ, 2004):

- construção de uma base de dados espacial;
- determinação dos parâmetros requeridos pelo modelo;
- desenvolvimento de uma interface de comunicação entre o modelo e o SIG.

O primeiro passo é o mais extenso e moroso, em termos gerais, é necessário digitalizar (topografia, geologia, tipo de solo, etc.) para convertê-la em formato digital.

Para existir uma interface entre o modelo e o SIG, é necessário existir correspondência entre os dois. O modelo a utilizar depende da problemática hidrológica a estudar. O SIG deve apresentar funcionalidades que permitam obter, editar e analisar a informação que o modelo requer.

Os referidos sistemas constituem o ambiente de inteligência que dá suporte de forma lógica e estruturante à gestão e ao processo decisório das diferentes esferas de aplicação, permitindo, inclusive, a construção de indicadores, baseados em análises geográficas, além de recolher, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados. Esta tecnologia tem sido alvo de crescente utilização no planeamento ambiental com forte adesão na gestão dos recursos hídricos.

Os SIG's são utilizados como ferramenta de análise espacial, na modelagem e simulação de cenários, como subsídio à elaboração de alternativas para a decisão da política de uso e ocupação do solo, ordenamento territorial, equipamentos urbanos e

monitorização ambiental, entre outras aplicações complexas, que envolvem diferentes componentes dinâmicos (MOTA, 1999).

Esta tecnologia permite integrar informações de dados cartográficos, cadastrais de diferentes naturezas, variáveis ambientais, entre outras, numa base de dados unificada, o que reflecte a multiplicidade de usos e a interdisciplinaridade.

É importante destacar a facilidade de integração dos dados das mais diversas áreas, como geologia, geomorfologia, pedologia, demografia, movimentos sociais, urbanismo, saneamento, ecologia entre outras, possibilitando uma abordagem ampla e completa.

A utilização destes recursos tecnológicos é proposta como instrumento articulador do processo de integração entre o planeamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos.

A maioria da informação necessária para apoio à gestão é georreferenciada, ou seja, é visualizada por meio de mapas. A informação sobre geologia, geomorfologia, uso do solo, tipo de solo, hidrografia, delimitações de sub-bacias, sistema viário, áreas verdes, declives etc., está relacionada com a sua localização geográfica. A sobreposição de mapas é facilitada por meio da utilização do SIG, pois permite a compilação e organização dos dados, e a elaboração de um mapa síntese que integra todos os temas, compreendendo as diversas características da área.

Deve considerar-se que os mapas utilizados para a gestão dos recursos hídricos e para a organização sócio espacial são dinâmicos, devendo estar em constante actualização, quando usados como instrumentos de tomada de decisão. A avaliação final dos resultados depende da qualidade e quantidade dos dados espaciais inseridos no sistema, quanto mais completa e de maior qualidade for a informação, mais preciso será o resultado.

2.2.3 Modelação hidrológica a partir de um modelo digital do terreno

Os modelos que tratam da distribuição espacial hídrica na bacia hidrográfica requerem dados baseados nas características topográficas tais como, limites da bacia hidrográfica e sub-bacias, inclinação do terreno, comprimento da encosta, forma do

declive, aspecto e canais de drenagem (MOORE *et al.*, 1993). Estes atributos topográficos podem ser determinados a partir de um modelo digital do terreno (MDT).

A caracterização dos processos hidrológicos numa bacia utilizando um SIG, apresenta algumas limitações que dificultam os processos de análise espacial que se pretendem efectuar no MDT. Estas limitações devem-se aos seguintes problemas (PAULO, 1998):

- escala adoptada para a modelação hidrológica;
- adopção da área mínima de drenagem;
- influência da resolução do MDT;
- delineamento automático da rede de drenagem da bacia hidrográfica;
- existência de depressões no MDT.

A escala adoptada na modelação hidrológica influencia o conteúdo dos mapas, pois determina a mais pequena área que neles pode ser desenhada e reconhecida. Por conseguinte, determina os cursos de água numa rede de drenagem. Quanto maior for a escala de um mapa, maior pormenor este apresenta, e, pelo contrário, quanto menor for a escala num mapa, maior é o grau de generalização visto que aumenta a área cartográfica mínima do terreno (PAULO, 1998).

A área mínima de drenagem corresponde à área mínima necessária para drenar para um ponto de forma a gerar escoamento. A adopção de uma área mínima de drenagem está, de certa forma, relacionada com a problemática da escala, pois quanto maior for o limiar, menor é o número de cursos de água gerados. Geralmente, assume-se que a área mínima de drenagem é constante e o seu valor é fixado por um julgamento arbitrário ou por uma comparação visual da rede digitalizada dos mapas topográficos (BAND, 1986).

A resolução ou o tamanho da célula, é a característica que mais condiciona a validade de um MDT para um determinado uso, nomeadamente na modelação hidrológica pois influencia a qualidade e a quantidade dos resultados obtidos. Quanto maior for a dimensão de cada célula (resolução) menor é a precisão ou detalhe na representação do espaço geográfico. A ideia de que uma resolução maior é a melhor opção pode não ser a mais correcta, pois o modelo poderá não funcionar com eficiência. No entanto, um modelo de pequena resolução pode não ser

suficientemente preciso em algumas zonas, tornando-se incoerente com a realidade. Assim, dever-se-á ajustar a resolução aos dados existentes, ao modelo a utilizar.

Os elementos básicos de uma análise hidrológica são as linhas de água, as bacias e as sub-bacias hidrográficas. Assim, a sua caracterização torna-se indispensável para qualquer estudo deste âmbito. Essa caracterização pode ser realizada recorrendo ao MDT, visto que contém informação que permite determinar a rede de drenagem superficial. Para obter a rede de drenagem superficial será necessário realizar um conjunto de operações de análise espacial.

O primeiro passo da criação das linhas de água com recurso aos SIG consiste no preenchimento das células do MDT de forma a evitar que o modelo forme linhas ou pontos sem escoamento (“Fill Sinks”), isto é, eliminar as depressões do MDT com o aumento da cota dos pontos que constituem essas depressões. Estas depressões devem ser removidas do MDT para então depois ser delineada a rede de drenagem (GARBRECHTN & MARTZ, 1997). As depressões podem resultar de erros dos dados geográficos de entrada, dos métodos de interpolação ou limitações da resolução. A remoção das depressões provoca alterações nos dados geográficos do MDT que podem ter um efeito significativo na modelação dos parâmetros hidrológicos (SRIVASTAVA, 2000).

Assim, a correcção da problemática das depressões é um aspecto fundamental para que seja possível utilizar o MDT como fonte de informação para a modelação hidrológica.

De seguida é necessário calcular a direcção do escoamento para todas as células da matriz com base no MDT. A direcção do escoamento foi fundamentada no princípio básico e evidente de que a água, no seu trajecto, se move para o menor potencial possível, isto é, é identificada a célula vizinha mais próxima em relação à qual o declive é máximo.

Operações de análise espacial efectuadas através do MDT:

Identificação dos “Sinks”

Eliminação dos “Sinks”

“Flow Direction”

“Flow Accumulation”

“Stream Network”

O escoamento acumulado pode ser obtido a partir da matriz da direcção do escoamento. Assim, o escoamento acumulado pode ser definido como o valor da área total, cujo fluxo, que se movimenta de célula em célula seguindo as direcções calculadas com o algoritmo anterior, escoam sobre a célula analisada.

A rede de drenagem superficial é, geralmente, extraída a partir dos dados do escoamento acumulado. Teoricamente, este processo fundamenta-se na consideração de que a presença de linhas de drenagem como estruturas concretas e definidas depende da acção do escoamento e do grau de importância do respectivo escoamento (FERNANDEZ, 2004).

2.3 MODELOS DE PREVISÃO DA EROSÃO HÍDRICA

O processo de modelação consiste na observação de fenómenos naturais e na sua descrição matemática. Aplicados a situações de campo, os modelos auxiliam na determinação das práticas conservacionistas e de gestão mais indicadas para os diferentes cenários de aplicação. Se essas determinações usassem apenas resultados experimentais, seriam altamente limitadas em termos de custo, tempo e também de imprevisibilidade, intrínseca a fenómenos naturais (FERREIRA & SMITH, 1988).

Em termos de pesquisa, os modelos matemáticos de erosão, quando empregues como parte de programas científicos e experimentais, auxiliam na identificação de lacunas do conhecimento (FOSTER & LANE, 1987).

Segundo CHAVES (1991), a crescente preocupação com problemas de assoreamento e poluição de cursos de água e de reservatórios contribuiu para o desenvolvimento de modelos matemáticos que prevêm a perda de sedimentos em pontos específicos da bacia hidrográfica. Estes são utilizados para a avaliação de práticas culturais e planeamento ambiental. De acordo com LANE *et al.*, (1992), a estimativa da erosão é essencial para determinar as práticas adequadas de conservação do solo e é útil para determinar a cultura ou prática agrícola mais benéfica. Infelizmente, é muito dispendioso e impraticável monitorizar a erosão em toda a bacia hidrográfica, daí a necessidade de prever a erosão com o uso da modelação (COCHRANE & FLANAGAN, 1999).

Modelos hidrológicos e de qualidade da água vêm sendo desenvolvidos para prever o impacto da agricultura na qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

2.3.1 Evolução dos modelos de erosão do solo

Apesar de os processos físicos simples poderem ser descritos de forma precisa, a maioria dos processos complexos, como os dissipativos, que incluem os processos hidrológicos e sedimentológicos, requerem suposições e simplificações, agregações e algum grau de empirismo na sua formulação, mesmo porque a tecnologia actual não permite a sua medição precisa (FERREIRA e SMITH, 1988).

Os objectivos da modelação da erosão do solo têm sido a identificação e a posterior representação de sub-processos importantes, bem como a desconsideração ou agregação daqueles menos importantes ou de pouca influência na representação do fenómeno descrito. Tal separação é, no entanto, muitas vezes definida em função do tipo de aplicação do modelo (FOSTER, 1988).

Diversas proposições têm sido elaboradas visando representar adequadamente o processo erosivo. O desenvolvimento de tecnologia para a estimativa da erosão hídrica foi iniciado por COOK, em 1936. Este autor identificou as três principais variáveis que afectavam a erosão hídrica, como sendo: a erodibilidade do solo, a erosividade da chuva e do escoamento superficial e a protecção do solo pelo coberto vegetal. Em 1940, ZINGG publicou a primeira equação para calcular a perda de solo, a qual considerava os efeitos da inclinação e do comprimento da rampa. Em 1941, SMITH adicionou à equação factores que permitiram considerar a influência dos sistemas culturais e da preparação do solo. Também adicionou o conceito de limite anual de perdas de solo e usou o resultado da equação para desenvolver um método gráfico para seleccionar práticas conservacionistas para determinadas condições de uso do solo típicas do oeste dos Estados Unidos. O desenvolvimento de modelos de estimativa de erosão continuou durante a segunda guerra mundial, mas publicações de pesquisas nesta área só ocorreram após a guerra. BROWNING, em 1947, adicionou factores de erodibilidade e uso do solo à equação proposta por SMITH, em 1941, e preparou tabelas para o estudo das perdas de solo por erosão, nas quais estão considerados diferentes tipos de solo, culturas e comprimentos de rampa (RENARD, 1997).

A partir da década de 50, com o surgimento da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), observou-se grande evolução na descrição físico-matemática do processo erosivo. Na época, a grande limitação de processos que permitissem a solução de equações matemáticas induzia à utilização de procedimentos fundamentados em bases empíricas, como é o caso da EUPS. O avanço da informática permitiu o desenvolvimento de procedimentos baseados em técnicas de simulação que possibilitaram considerar as variações espaciais e temporais inerentes ao processo erosivo (GROSH & JARRETT, 1994).

2.3.2 “Universal Soil Loss Equation” (USLE) ou Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS)

Com a utilização da USLE é possível fazer a previsão das perdas de solo causadas pela erosão, bem como indicar quais são os factores que exercem maior influência sobre as perdas de solo. Foi desenvolvida em 1954, no "Runoff and Soil-Loss Data Center", sediado na Universidade Purdue - EUA (WISCHMEIER & SMITH, 1965), apresentando a seguinte fórmula:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

em que:

A = perdas de solo ou erosão específica, t/ha/ano;

R = factor de erosividade da precipitação, MJ.mm/ha.h;

K = factor de erodibilidade do solo, (t /ha) / (MJ/ ha.mm/ h);

LS = factor fisiográfico, que compreende o comprimento da encosta (L), e o declive (S), a dimensional;

C = factor relativo ao coberto vegetal, a dimensional;

P = factor de práticas agrícolas ou de medidas de controlo da erosão, a dimensional.

É importante salientar que, mesmo nas regiões em que existem bases de dados suficientes para dar suporte à utilização da USLE, a sua aplicação apresenta algumas limitações, ou seja, além de ser uma equação de previsão apenas de erosão e, conseqüentemente não considerar a deposição, ela não estima a erosão de sulcos

em fases mais avançadas e nem a perda de solo decorrente de chuvas isoladas (RISSE *et al.*, 1993).

Apesar da existência de um consenso entre os investigadores da área, de que com o uso da USLE se obtém boa estimativa da erosão sazonal, ela não é capaz de satisfazer os crescentes desafios impostos pelos problemas de erosão (WILLIAMS, 1975; FOSTER, 1982 e OWOPUTI & STOLTE, 1995). Por exemplo, WILLIAMS (1975) verificou que com a utilização da USLE não se pode estimar a perda de solo efectiva de canais ou barrancos, e FOSTER (1982) relatou que a USLE não fornece informação adequada das variabilidades temporal e espacial da erosão durante uma chuvada. Porém, isso não quer dizer que modelos empíricos como a USLE não tenham valor, pois na prática muitos projectos serão baseados nesses modelos empíricos até que o processo físico da erosão seja melhor compreendido.

Na tentativa de aperfeiçoar ou adaptar a estrutura da USLE a outras finalidades, foram feitas modificações em alguns dos seus factores, que resultaram em modelos diferentes, mantendo, no entanto, uma estrutura semelhante. Exemplos mais conhecidos desses modelos são: “Modified Universal Soil Loss Equation” (MUSLE) (WILLIAMS, 1975), desenvolvida para previsão do transporte de sedimentos na secção de descarga de pequenas e médias bacias hidrográficas; o modelo ONSTAD/FOSTER (ONSTAD & FOSTER, 1975), no qual o termo de erosividade é separado em um factor de chuva e outro de enxurrada; e o modelo “Erosion Productivity Impact Calculator” (EPIC) (WILLIAMS *et al.*, 1984 e SHARPLEY & WILLIAMS, 1990), com o qual não se prevê apenas a erosão, mas também a sua relação com a perda de produtividade e, mais recentemente, a RUSLE (RENARD *et al.*, 1991 e RENARD, 1997), que é uma actualização da USLE com modificações na estimativa dos factores K, C e LS.

2.3.3 “Water Erosion Prediction Project” (WEPP) ou Projecto de Previsão da Erosão Hídrica (PPEH)

O WEPP representa a última geração de modelos baseados em processos, incorporando os desenvolvimentos anteriores de MEYER & WISCHMEIER (1969), FOSTER & MEYER (1972) e MEYER *et al.* (1975).

O modelo WEPP constitui um pacote tecnológico de previsão da erosão desenvolvido por um programa interinstitucional envolvendo as instituições norte

americanas: USDA – “Natural Resources Conservation Service”, “Agricultural Research Service”, USDA – “Forest Service” e USDI – “Bureau of Land Management”, entre outras, envolvidas na conservação da água e do solo e no planeamento e avaliação da qualidade ambiental. Tal pacote teve como objectivo elaborar uma tecnologia para o planeamento ambiental e para a conservação da água e do solo, de modo a permitir a previsão dos impactos resultantes de práticas culturais para a produção agrícola, pastagens e áreas florestais, especialmente no que se refere à erosão (CHAVES, 1996).

O modelo WEPP apresenta várias vantagens em relação a outras tecnologias de previsão da erosão, como a capacidade de estimar as distribuições espacial e temporal da perda de solo, a deposição e a perda de solo na vertente ou em cada ponto dela, a nível diário, mensal ou anual. Além da opção de simulação contínua, o modelo também pode ser utilizado na opção evento a evento (CHAVES, 1992).

Este modelo não prevê apenas as taxas de erosão do solo, mas também a libertação de sedimentos (MACHADO *et al*, 2003).

O projecto WEPP é constituído de três versões básicas: versão para vertentes (“hillslope version”), versão para bacias hidrográficas (“watershed version”) e versão para quadrícula (“grid version”) (MACHADO *et al*, 2003).

O modelo WEPP opera diariamente para calcular as condições de solo e vegetação quando ocorre um evento de chuva, e logo utiliza essa informação para prever a hidrologia e erosão a partir de eventos individuais (LAFLEN *et al.*, 1994).

O WEPP inclui os processos hidrológicos fundamentais de precipitação, infiltração e escoamento superficial, além dos processos erosivos básicos de desprendimento, transporte e deposição, tanto em vertentes (“hillslope version”) como em bacias hidrográficas (“watershed version”) (ROMERO & STROONSNIJDER, 2002).

Segundo FLANAGAN & NEARING (1995) o WEPP é uma tecnologia de previsão de erosão hídrica do solo, baseada nas seguintes ciências: estatística climática, teoria da infiltração, hidrologia, fitotécnia, hidráulica e mecanismos de erosão. O WEPP é um modelo de previsão da erosão hídrica, distribuído nos parâmetros e de simulação contínua. Os parâmetros de entrada incluem o período e a intensidade da precipitação; a textura do solo; o desenvolvimento das plantas; a decomposição dos resíduos da cultura; a forma, o declive e a orientação das encostas; e a erodibilidade do solo.

As vantagens do WEPP sobressaem através da ligação que faz dos processos de destacamento, devido ao impacto das gotas de chuva e fluxo do escoamento superficial, ao transporte de sedimentos e à sua deposição, sendo ainda relevante, o seu potencial na avaliação da variação espacial da erosão e da deposição de sedimentos ao longo do perfil de encosta (FLANAGAN & NEARING, 1995).

A generalização da aplicação do modelo “Water Erosion Prediction Project “ (WEPP) ao nível de pequenas bacias hidrográficas, com auxílio do SIG, pode constituir um avanço qualitativo para a caracterização da erosão hídrica e para o apoio à decisão no contexto da conservação do solo e gestão dos recursos hídricos (FERNANDEZ *et al*, 2004).

O modelo WEPP produz vários tipos de saídas, com diferentes níveis de detalhe nos resultados. As saídas mais comuns apresentam informação sumária, ao nível do evento, dos seguintes parâmetros: escoamento, erosão, produção de sedimentos, enriquecimento dos sedimentos e distribuição espacial da perda de solo.

O modelo WEPP pode ser dividido, conceptualmente, em seis componentes: i) Climática, com a qual, por meio de um algoritmo baseado na cadeia de Markov de estágio duplo, considerando dados históricos, são gerados dados climáticos para uma localidade específica; ii) Hidrológica, sendo a infiltração calculada pela equação de Green-Ampt; iii) Crescimento das plantas; iv) Solos; v) Erosão / Deposição; e vi) Irrigação (MACHADO *et al*, 2003).

De acordo com CHAVES (1992) as componentes do modelo WEPP são descritas da seguinte forma:

i) Climática

O clima pode ser gerado de forma estatística por um submodelo paralelo (CLIGEN), no qual informações sobre volume, duração, intensidade e frequência de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar e direcção e velocidade do vento para a localidade de interesse são geradas com base em séries históricas da estação meteorológica mais próxima. As informações geradas pelo submodelo CLIGEN são gravadas num ficheiro de clima, para posterior utilização pelo modelo WEPP. Dados reais de clima, ou mesmo dados sintéticos, podem também ser directamente utilizados pelo modelo, sem a necessidade de utilização do CLIGEN.

ii) Hidrológica

A componente hidrológica do modelo calcula a infiltração, o escoamento superficial e o balanço hídrico diário, incluindo a evapotranspiração e a percolação profunda. A infiltração é calculada através do modelo de Green-Ampt, modificado para intensidades variáveis de chuva e tempo de encharcamento. O escoamento superficial é estimado através da equação da onda cinemática para escoamento unidireccional, com solução analítica obtida pelo método das características.

iii) Crescimento das plantas

A cobertura vegetal tem uma grande importância na erosividade. O ciclo vegetativo nem sempre está coordenado com o ciclo das chuvas, de tal forma que a simulação dinâmica da vegetação é necessária para uma adequada previsão da erosão. A componente do crescimento das plantas estima o crescimento, a senescência e a decomposição dos resíduos culturais. No caso de culturas anuais, o crescimento das plantas é estimado em função do número de graus-dia e da humidade do solo.

iv) Solos

Muitos dos parâmetros de solo utilizados nas componentes hidrológicas e de erosão são dinâmicos em função das operações culturais, intempéries e histórico da precipitação, e são reajustados, automaticamente, em função do tempo, das operações culturais e dos processos hidrológicos.

v) Erosão / Deposição

A componente erosão do modelo WEPP utiliza a equação permanente de continuidade de sedimento como base de cálculo da erosão. A erosão do solo é dividida em erosão entre sulcos e erosão em sulcos. A erosão entre sulcos é descrita como o processo de desprendimento das partículas de solo pelo impacto das gotas da chuva, pelo transporte no escoamento de lâmina rasa e pela libertação de sedimentos para os pequenos sulcos ou canais. A erosão em sulco é descrita como função da capacidade do escoamento em desprender os sedimentos, da capacidade de transporte do escoamento e da carga de sedimentos existentes no escoamento (FLANAGAN & NEARING, 1995).

Além da desagregação, o modelo estima o seu transporte, e quando houver mais sedimentos do que a capacidade de escoamento em transportá-los o modelo passa a estimar a deposição.

vi) Irrigação

A componente irrigação é opcional, podendo entrar no modelo no caso das culturas de regadio.

A equação básica para a erosão total é expressa da seguinte forma (FOSTER *et al.*, 1989, citados por CHAVES, 1992):

$$\delta G / \delta x = K_r (t - t_c) (1 - G/T_c) + K_i I^2 \quad (2.2)$$

em que:

G = carga de sedimento em um ponto x (m) da encosta, kg/m.s;

K_r = parâmetro de erodibilidade em sulcos, s/m;

t = tensão de cisalhamento que actua nas partículas de solo, Pa;

t_c = parâmetro de resistência ao cisalhamento, Pa;

T_c = capacidade de transporte dos sedimentos pelo escoamento, kg/m.s;

K_i = parâmetro de erodibilidade entre sulcos, kg/m⁴.s;

I = intensidade da chuva, m/s.

Os parâmetros K_i, K_r e t_c devem ser determinados experimentalmente para cada solo, em parcelas de perda de solo com chuva simulada, ou em parcelas com chuva natural; neste caso através de técnicas de optimização.

O componente K_iI² é a contribuição das áreas entre sulcos ao sulco. A tensão de cisalhamento t é estimada através da equação:

$$t = P * R * S \quad (2.3)$$

em que:

P = peso específico do escoamento em uma dada secção, N/m³;

R = raio hidráulico, m;

S = declive médio da secção, m/m.

A capacidade de transporte T_c é estimada através de uma simplificação da equação de Yalin, que utiliza, entre outros factores, a tensão de cisalhamento (t) sobre o solo.

Quando $G > T_c$, ou seja, quando houver condições de deposição no sulco, esta será estimada pela seguinte equação:

$$\delta G / \delta x = (B V_f / q) (T_c - G) \quad (2.4)$$

em que:

B = coeficiente de turbulência induzida pelo impacto das gotas de chuva, a dimensional $\approx 0,5$;

V_f = velocidade de sedimentação de uma certa classe (ϕ) de sedimento, m/s;

q = vazão por largura unitária do sulco, m²/s.

Os valores negativos obtidos na equação anterior indicam deposição.

Desta forma, o modelo estimará os processos hidrossedimentológicos que ocorrem na vertente, prevendo, entre outros, o volume de escoamento superficial; a vazão de pico; a perda de solo e a deposição média na vertente; a perda e deposição máximas e suas localizações; a quantidade de sedimentos proveniente da vertente e a informação sobre o tipo de sedimentos erodidos; e a sua distribuição por classe de diâmetro e matéria orgânica. As previsões podem ser efectuadas ao nível do evento, da média mensal ou da média anual (CHAVES, 1992).

As previsões do modelo WEPP oferecem um detalhe bem maior do que a simples perda de solo média anual, que se extraí da maioria dos modelos de erosão. Esse grau de pormenorização, por sua vez, permite ao gestor a escolha e o dimensionamento mais seguro e preciso das práticas conservacionistas a implementar, além de dar indicações sobre os possíveis impactos ambientais devido à quantidade de sedimentos nas áreas a jusante da vertente (CHAVES, 1992).

Estudos de validação do modelo, com dados de parcelas tipo USLE, indicam que ele representa eficazmente os principais mecanismos de erosão e sedimentação (CHAVES, 1996).

A calibração dos parâmetros de erodibilidade do modelo deve ser realizada por experimentação em parcelas de erosão em sulcos. No entanto, devem ser tomados cuidados em relação à calibração dos parâmetros e à determinação dos valores das variáveis do modelo, inclusive em relação à sua distribuição espacial, em função dos erros a eles associados (MACHADO *et al*, 2003).

Os principais dados para simular com o modelo WEPP necessitam ser especificados em quatro ficheiros ou base de dados: clima, solos, relevo e utilização do solo. O ficheiro de clima requer valores diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas e radiação solar. Além da quantidade de precipitação, o modelo requer três variáveis relacionadas com a intensidade das chuvas, as quais são utilizadas para calcular as taxas de excesso referentes a estas, e decidir sobre a ocorrência de escoamento. O ficheiro de relevo consiste numa sequência de elementos relacionados com este, com propriedades uniformes no que respeita ao fluxo superficial, os chamados Elementos de Fluxo Superficial (OFE). Estes estão definidos como porções de uma rampa com solo, cultura e manejo homogêneos e são as unidades básicas para a modelação dos processos hidrológicos superficiais, de erosão e crescimento vegetal (ROMERO & STROONSNIJDER, 2002).

O ficheiro de manejo da utilização do solo contém informação necessária para definir condições iniciais, práticas culturais, parâmetros de crescimento vegetal e gestão dos resíduos das culturas. Este é o ficheiro com maior número de parâmetros (ROMERO & STROONSNIJDER, 2002).

O modelo contém três parâmetros de erosão, um de erosão entre sulcos e dois de erosão dentro dos sulcos. A remoção das partículas do solo entre os sulcos ocorre pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial, como se descreve pela seguinte equação:

$$D_i = K_i (i * q) \quad (2.5)$$

em que:

D_i = remoção de partículas entre sulcos, $\text{kg/m}^2.\text{s}$;

K_i = erodibilidade entre sulcos, $\text{kg/m}^4.\text{s}$;

i = intensidade da chuva, m/s;

q = taxa de escoamento, m/s.

A remoção das partículas do solo devido ao fluxo de água num sulco é proporcional ao excesso de esforço do corte hidráulico que a água exerce sobre as paredes dos sulcos e pode ser descrito pela seguinte equação:

$$D_r = K_r (t - t_c) \quad (2.6)$$

em que:

D_r = remoção nos sulcos, kg/m².s;

K_r = erodibilidade nos sulcos, kg/m⁴.s;

t = tensão de cisalhamento do escoamento, kg/m.s²;

t_c = tensão de cisalhamento crítico, kg/m.s².

$$t = g * d * s \quad (2.7)$$

em que:

g = gravidade, kg/m².s²;

d = profundidade do fluxo, m;

s = inclinação da vertente, Ø.

A erodibilidade entre sulcos (K_i), no sulco (K_r) e a tensão de cisalhamento crítico (t_c) foram calculados utilizando equações que relacionam as componentes do solo (FLANAGAN & NEARING, 1995), e que serão apresentadas no capítulo 4.

2.3.4 Calibração e validação dos modelos

O modelo apresenta uma utilização limitada se não for ajustado e verificado.

O processo de validação resulta da comparação entre os resultados obtidos através do modelo, com dados obtidos em ensaios de laboratório ou resultados de campo (DONIGIAN & RAO, 1990).

Os principais erros que ocorrem na modelação derivam dos dados utilizados, do modelo seleccionado, da identificação dos parâmetros e aplicação dos algoritmos de cálculo (RISSE, 1994).

Por esta razão os modelos apenas são válidos para as condições representadas pelo conjunto de dados e condições utilizadas na calibração e validação.

Uma das importantes formas de avaliação de um modelo é a comparação entre os dados estimados pelo modelo e os dados observados.