
Cerdan et. al. (2010), análises estatísticas confirmam a influência dominante da cobertura para a erosão do solo.

Dessa forma, a vegetação possui papel de extrema relevância na avaliação do potencial à erosão a medida que diminui a ação direta do *Splash* no solo.

Foram utilizadas imagens de satélite LANDSAT – 5 do ano de 2011, baixados no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (http://www.dgi.inpe.br/CDSR/), fazendo-se composição de bandas no software ENVI e, posteriormente, foi extraído o *Normalized Difference Vegetation Index* também no ENVI.

Para a extração do índice NDVI, foram usadas bandas do infra-vermelho próximo (0,760 – 0,900) e o vermelho (0,630 – 0,690), que no sensor TM das imagens LANDSAT correspondem as bandas 4 e 3 respectivamente.

Na banda 4, a vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia, aparecendo bem clara nas imagens, e apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Na banda 3, a vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas), e apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta).

Os valores das células do raster de saída variam de -1 a +1, onde valores mais altos correspondentes aos solos com cobertura vegetal, e os mais baixos aos solos expostos.

• <u>Conjunto 3 = Capacidade De Transporte</u>

(i) Resultados do conjunto 2 – Potencial de escoamento superficial (PES).

(ii) <u>Declividade</u> (DEC) – Para Gabriels (1999), quanto mais íngreme a inclinação da encosta maior a perda de solo por causa do aumento na velocidade da água de escoamento. Segundo Cohen et. al (2008), o transporte de sedimentos é influenciado por uma variedade de fatores dentre estes as características topográficas.

Esse parâmetro também foi obtido no ArcGis, com a ferramenta *Spatial Analyst*, e utilizou o modelo digital ASTER - GDEM.

- 35 -

No processamento do *software*, para cada célula *Slope* calcula a taxa máxima de alteração no valor a partir dessa célula aos seus vizinhos. Basicamente, a alteração máxima na elevação ao longo da distância entre a célula e seus oito vizinhos identifica a descida mais íngreme a partir da célula.

(iii) <u>Pedoforma da Encosta</u> (PED) – A Curvatura de uma superfície é um atributo topográfico que descreve convexidade / concavidade de uma superfície do terreno. De um ponto de vista aplicado, a pedoforma da encosta pode ser usada para descrever as características físicas de uma bacia de drenagem, num esforço para compreender os processos de erosão e do escoamento. A declividade afeta a taxa global de movimento, enquanto a curvatura do perfil afeta a aceleração e desaceleração do fluxo e, portanto, influencia a erosão e deposição.

Zevenbergen & Thorne (1987), ao fazerem uma analise comparativa da topografia da superfície da terra, apontam para dois tipos de curvatura da superfície (pedoforma da encosta), uma curvatura na direção do gradiente de declividade (*profile curvature*) e outra transversal (*plan curvature*). Para o presente estudo considerou-se apenas a curvatura na direção do gradiente de declividade, pois influencia na taxa de variação da inclinação, afeta aceleração do fluxo e, portanto, influencia o assoreamento e a degradação (Zevenbergen & Thorne, 1987). Para Romstad & Etzelmuller (2012), a curvatura descreve a taxa de variação da inclinação ao longo de uma linha de fluxo e pode ser relacionado com a aceleração / desaceleração do fluxo gravitacional.

Segundo IPT (1986) existe uma maior concentração de ocorrências erosivas em relevos de transição e morrotes constituídas por vertentes relativamente declivosas, superiores a 15% e com perfis convexos e retilíneos. Pois a existência comum de vertentes com rupturas de declive favorecem nesses locais a concentração de águas pluvias. De acordo com Resende (1985), o carreamento de terra em condições comparáveis, é menor na encosta côncava e maior na Convexa.

Foi obtido no ArcGis, com a ferramenta *Spatial Analyst*, e utilizou o modelo digital ASTER – GDEM.



Figura 8 - Ilustração do carreamento de terra (Resende, 1985).

• <u>Conjunto 4 = Potencial De Erosão Do Solo</u>

(i) Resultados do conjunto 3 – <u>Capacidade de Transporte</u> (PCT).

(ii) <u>Densidade do Solo</u> (DA) – Segundo Brady (1989), densidade de volume ou densidade aparente representa a massa de solo seco, por unidade de volume, incluídos seus espaços de ar. A densidade aparente é determinada pela quantidade dos espaços porosos, como também pelos sólidos dos solos. Assim, solos com elevada proporção de espaços de poros em relação aos sólidos, tem densidades de volume menores do que outros mais compactados e com menos espaços de poros (Brady, 1989). O aumento da densidade aparente com a profundidade do perfil tende a aumentar, devido às pressões exercidas pelas camadas superiores que provocam a compactação do solo, reduzindo a porosidade (Kiehl, 1979).

Este fator foi utilizado na avaliação da compactação da camada superficial do solo, na profundidade de aproximadamente 5 cm. Os dados de densidade aparente foram obtidos através de coletas realizadas em campo pela equipe do LAGESSOLOS DA UFRJ (Lima 2008), e para o mapeamento utilizou-se o interpolador IDW (Inverse Distance Weighted).

(iii) <u>Porosidade Total</u> (PORO) – Entende-se por porosidade de um solo o volume não ocupado pelos constituintes sólidos do solo. Tal volume é ocupado pelo ar e pela água (Silva, 2005). O tamanho deste espaço de poros é, em grande parte, consequente da arrumação das partículas sólidas. Se há tendência em

permanecerem em contato íntimo, como nas areias e subsolos compactos, a porosidade total fica reduzida. Se são distribuídos em agregados porosos, como é comum nos casos de solos de textura média, com elevado montante de matéria orgânica, os espaços de poros por unidade de volume serão elevados (Brady, 1989).

De acordo com Guerra (2001), a porosidade está relacionada de maneira inversa com a densidade aparente, ou seja, à medida que a densidade aparente aumenta, a porosidade diminui, consequentemente ocorre à redução da infiltração da água no solo.

Os valores de Porosidade foram calculados através dos dados de Densidade Aparente e Densidade de Partículas (Lima 2008), e para o mapeamento utilizou-se o interpolador IDW (Inverse Distance Weighted).

2.5 - PADRONIZAÇÃO NÃO-BOOLEANA DOS DADOS

Os dados foram padronizados em uma escala contínua de adequabilidade variando entre 0 (menos adequada) – 255 (mais adequada). Os fatores contínuos resultantes que foram produzidos foram desenvolvidos usando funções de associação a conjuntos *fuzzy*, isto é, a transição entre membros e não membros de uma localização no conjunto é gradual.

O reescalonamento dos dados foi realizado no *software* IDRISIS ANDES, utilizando-se a ferramenta FUZZY, que estima os valores de cada elemento do conjunto *fuzzy* (possibilidade) em cada pixel baseado nas seguinte funções de pertinência: sigmoidal; j-shaped; linear

As funções Sigmoidal, J e Linear são controladas por quatro pontos ordenados, do mais baixo ao mais alto na escala de medida. Os pontos podem ser duplicados para criar funções monotônicas ou simétricas. No presente estudo foram utilizadas as funções Sigmoidal e Linear.

A função Sigmoidal é produzida usando uma função cosseno:

$$\mu \mathrm{Ai} = \left(\cos^2 \frac{(x - P_{\mathrm{Max}})}{(\mathbf{P}_{\mathrm{Max}} - \mathbf{P}_{\mathrm{Min}})} \frac{\pi}{2} \right)_{(4)}$$

A função Linear utilizada é apresentada a seguir:

$$\mu At = \frac{P_{Min} - x}{P_{Max} - P_{Min}}$$
(5)

 <u>Índice de Umidade</u>: tendência de a água acumular em algum lugar da bacia, e a tendência da força gravitacional para mover a água pela encosta. Quanto maior o Índice de Umidade, maior o potencial à erosão.

A padronização foi realizada através de uma função sigmoidal – *Monotonically Increasing*; onde o ponto a = 0 e o ponto b = 10.

 <u>Aspecto da Vertente</u>: todas as vertentes de uma encosta possuem diferentes níveis de susceptibilidade para o potencial à erosão. Os dados categóricos foram escalonados determinando-se um índice subjetivo para cada categoria. Foram atribuídos os índices:

CATEGORIA	POTENCIAL	ÍNDICE
Flat (-1)		
North (0-22.5)	Muito Baixo	50
Northeast (22.5-67.5)		
East (67.5-112.5)		
Southeast (112.5- 157.5)	Alto	200
South (157.5-202.5)	Alto	200
Southwest (202.5- 247.5)	Muito Alto	255
West (247.5-292.5)	Médio	150
Northwest (292.5-	Baixo	100

Quadro 2 - Potencial à erosão dos solos em relação ao aspecto da vertente

337.5)		
North (337.5-360)	Muito Baixo	50

• <u>Capacidade de Campo</u>: Quantidade máxima que um solo pode reter água. Maior capacidade para reter água, igual menor potencial à erosão.

A padronização foi realizada através de uma função linear – *Monotonically Decreasing*; onde o ponto c = 11,7005 % vol e o ponto d = 33,3785 % vol

• <u>Condutividade Hidráulica</u>: Facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil do solo. De uma forma geral, maior condutividade significa menor capacidade de reter água, ou seja, maior potencial à erosão.

A padronização foi realizada através de uma função linear – *Monotonically Increasing*; onde o ponto a = 4,63 mm-hr e o ponto d = 121,01 mm-hr.

• <u>Precipitação Média Anual</u>: Quanto maior o volume de chuva, maior o potencial à erosão.

A padronização foi realizada através de uma função sigmoidal – *Monotonically Increasing*; onde o ponto a = 200 mm e o ponto b = 300 mm.

 <u>Cobertura Vegetal</u>: Quanto maior o valor do NDVI, menor o potencial à erosão.

A padronização foi realizada através de uma função linear – *Monotonically Decreasing*; onde o ponto c = -0,33 e o ponto d = +0,82.

• <u>Declividade</u>: Quanto maior a declividade, maior o potencial à erosão.

A padronização foi realizada através de uma função Sigmoidal – *Monotonically Increasing*; onde o ponto a = 0º e o ponto b = 45º.

• <u>Pedoforma da Encosta</u>: Quanto mais convexa (valores positivos), maior o potencial a erosão.

A padronização foi realizada através de uma função Sigmoidal – *Monotonically Increasing*; onde o ponto a = -10 e o ponto b = 1.

• <u>Densidade do Solo</u>: Quanto menor a Densidade Aparente do solo, menor o potencial à erosão.

A padronização foi realizada através de uma função Linear – *Monotonically Increasing*; onde o ponto a = 0 e o ponto b = $1,45 \text{ g/cm}^3$.

• <u>Porosidade Total</u>: Quanto maior a Porosidade Total do solo, menor o potencial a erosão.

A padronização foi realizada através de uma função Linear – *Monotonically Decreasing*; onde o ponto c = 41% e o ponto d = 70%.

2.6 - SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY (SIF)

O desenvolvimento dos modelos para os sistemas de inferência foi feito a partir do planejamento da combinação das variáveis de entrada de forma a gerar produtos intermediários com significado semântico, permitindo pontos de controle no processo de apoio à tomada de decisão. Foram estabelecidos quatro grupos de variáveis:

POTENCIAL DE UMIDADE DO SOLO - POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL - POTENCIAL DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE - POTENCIAL DE EROSÃO DO SOLO

Para cada grupo de fatores foi estabelecida uma forma de combinação através de SIFs, objetivando manter a cada resultado parcial o significado e a possibilidade de usar a imagem resultante como elemento de controle da qualidade e significância do processamento.

<u>SIF 1</u>: Índice de Umidade (IU) + Capacidade de Campo (CC) = Índice de Umidade Ampliado (IUA).



<u>SIF 2</u>: Índice de Umidade Ampliado (IUA) + Aspecto da Vertente (ASP) = Potencial de Umidade do Solo (PU):





<u>SIF 4</u>: Condutividade Hidráulica Ampliada (CHA) + Cobertura da Vegetação (VEG) = CHAV:



<u>SIF 5</u>: CHAV + Potencial de Umidade do Solo (PU) = Potencial de Escoamento Superficial (PES):



<u>SIF 6</u>: Declividade (DEC) + Pedoforma da Encosta (PED) = Declividade Ampliada (DECA):



<u>SIF 7</u>: Declividade Ampliada (DECA) + Potencial de Escoamento Superficial (PES) = Potencial de Capacidade de Transporte (PCT):



<u>SIF 8</u>: Densidade do Solo (DA) + Porosidade (PORO) = Textura do Solo (TEXSOL):



<u>SIF 9</u>: Textura do Solo (TEXSOL) + Potencial de Capacidade de Transporte (PCT) = Potencial a Erosão (PE):



De forma geral, as variáveis de entrada foram modeladas com base em 5 estados, definidos em funções de pertinência triangulares (Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto, Muito Alto, potencial a erosão). A opção pelas funções triangulares deve-se ao fato de se ajustarem adequadamente a variáveis linguísticas que descrevem estados e em função da transição desses estados ser linear e contínua, numa escala de "muito baixo" a "muito alto" (Jamel, 2010). Como todos os dados de entrada dos SIFs variavam de 0 a 255, o pico dos triângulos extremos foi ajustado para esses valores e o espaço entre as funções extremas foi dividido equitativamente.



Figura 9 - Função triangular utilizada n0 SIF 1.

Cada subsistema SIF foi processado individualmente, com base em comandos do MATLAB, sendo os passos registrados abaixo, a título de exemplo, para o SIF 7 (Jamel, 2010).

a) Exportar o SIF do módulo Fuzzy Toolbox para o Workspace.

 b) Preparo das variáveis para processamento, com a conversão do formato matricial para uma coluna de valores (array) de cada píxel, através da função IM2COL.

O prenome "col" foi utilizado em todas as variáveis convertidas para o formato coluna, para identificação.

>> coldeca = im2col(deca,'indexed',[593 1276],'distinct');

>> colpes = im2col(pes,'indexed',[593 1276],'distinct');

c) Alocação de memória para a variável de entrada da função EVALFIS, constituída pelas duas colunas compostas numa matriz [756.668,2], que primeiro é preenchida em zeros com a função ZEROS:

>> entradasif7 = zeros(756668,2);

d) Em seguida é feito o preenchimento dessa variável de entrada (entradasif7, no exemplo) com as duas colunas geradas anteriormente. Neste passo é feita simultaneamente a conversão do formato UINT8 (unsigned integer 8 bits) para o formato "double" (ponto flutuante de dupla precisão), adequado ao processamento:
>> entradasif8(:,1) = double(coldeca);

>> entradasif8(:,2) = double(colpes);

e) Processamento do SIF, através da função em linha de comando EVALFIS, sendo Sif 7 o nome do SIF a ser utilizado, já carregado no Workspace:

>> colpct = evalfis(entradasif7,sif7);

f) A variável obtida como saída, colpct, já está no formato coluna/double e pode entrar no SIF seguinte.

g) Para recomposição da variável de saída no formato imagem, foi utilizada a função RESHAPE, que remonta a matriz original em linhas e colunas. A função IMAGE foi utilizada para mostrar a imagem em modo gráfico, permitindo a visualização e controle de parâmetros, como a escala de cores utilizada.

>> pct = reshape(colpct,[593 1276]);

>> image(pct)

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 - POTENCIAL DE UMIDADE DO SOLO

O mapeamento do Potencial de Umidade do Solo foi realizado através da sobreposição de mapas temáticos com a aplicação de dois Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIF), SIF 1 e SIF 2:

 a) SIF 1 - Índice de Umidade (IU) + Capacidade de Campo (CC) = Índice de Umidade Ampliado (IUA).



Para o mapeamento do Potencial de Umidade do Solo, o primeiro parâmetro analisado foi o Índice de Umidade (IU), que demonstra a tendência de a água acumular em algum lugar da bacia, e a tendência da força gravitacional para mover a água pela encosta, ou seja, quanto maior o IU, maior o potencial a erosão. O mapa do IU (**Figura 10**) apresenta, em azul, os locais onde há a tendência de acúmulo de água, que indicam grandes áreas de contribuição e áreas mais planas. Localizações mais íngremes recebem um valor de índice pequeno pois são áreas mais bem drenadas, enquanto localizações suavemente inclinadas recebem um valor de índice elevado.

O padrão especial do IU apresentado na **Figura 10** está diretamente relacionado com o Modelo de Elevação Digital ASTER-GDEM (30 metros de resolução espacial) utilizado na geração do Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente Consistido.

- 46 -

A distribuição espacial da Capacidade de Campo apresentada na **Figura 11** apresenta uma relação inversa com o potencial a erosão, ou seja, quanto maior capacidade para reter água, menor potencial à erosão. Essa distribuição espacial está diretamente relacionada com o interpolador utilizado na geração da superfície da Capacidade de Campo, que para esse estudo utilizou-se o IDW (Inverse distance weighted) que determina os valores das células utilizando uma combinação linear ponderada de um conjunto de pontos de amostra. O peso é uma função da distância inversa.



Espacialização do Índice de Umidade (IU) na área de estudo.



O produto gerado do SIF 1, que aqui foi classificado como Índice de Umidade Ampliado, indica claramente a variação espacial do potencial a erosão considerando apenas o Índice de Umidade (IU) e a Capacidade de Campo (CC). Ou seja, na **Figura 12**, abaixo, os altos valores de IUA coincidem com altos valores de Índice de Umidade (IU) e baixos valores de Capacidade de Campo (CC), e que correspondem ao alto potencial a erosão.

Observa-se na **Figura 12** como áreas bem drenadas, com maior capacidade para reter água, evitando grande acúmulo de água, apresentaram os menores valores, e com isso representam as áreas com menor potencial a erosão dos solos, considerando apenas esses parâmetros. Essa tendência é evidenciada na **Figura 12** através da coloração amarelada indo até esverdeada.

Contrariamente, áreas pouco drenadas, com grande potencial para acumular água, representam as áreas com maior potencial a erosão, e estão evidenciadas na **Figura 12** pela coloração mais azul e vermelha.



 b) <u>SIF 2</u>: Índice de Umidade Ampliado (IUA) + Aspecto da Vertente (ASP) = Potencial de Umidade do Solo (PU):



A distribuição espacial do Potencial de Umidade do Solo foi gerada a partir do resultado da sobreposição do Índice de Umidade do solo (IU) com a Capacidade de Campo (CC) que resultou no Índice de Umidade Ampliado (IUA), acrescentando-se o parâmetro Aspecto da Vertente (ASP).

No presente estudo, o Aspecto da Vertente foi utilizado para representar a posição do relevo em relação a incidência de chuvas e, dessa forma, vertentes com orientação sudoeste e sul foram as que receberam maiores valores, consequentemente são as que estão mais relacionadas com alto potencial a erosão.

Como resultado da sobreposição de altos valores de IUA mais as vertentes voltadas para sudoeste e sul, obteve-se o mapa de Potencial de Umidade do Solo (**Figura 14**), onde as áreas com coloração de azul a vermelho indicam áreas com altos valores de PU e, consequentemente, alto potencial a erosão.





3.2 - POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O mapeamento do Potencial de Escoamento Superficial foi realizado através da sobreposição de mapas temáticos com a aplicação de três Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIF), SIF 3, SIF 4 e SIF 5:

 a) SIF 3 - Condutividade Hidráulica (CH) + Precipitação Média (PREC) = Condutividade Hidráulica Ampliada (CHA)



O segundo grupo analisado foi o Potencial de Escoamento Superficial, e o primeiro processamento contemplou dados de Condutividade Hidráulica do solo (CH) e Precipitação Média anual (PREC), resultando no parâmetro chamado de Condutividade Hidráulica Ampliado (CHA).

O parâmetro Condutividade Hidráulica demonstra a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil do solo, ou seja, maior condutividade significa menor capacidade de reter água e, maior potencial à erosão. Dessa forma, na **Figura 15** abaixo, a coloração mais amarelada indica altos valores de CH e maior potencial a erosão.

A distribuição espacial das chuvas ao longo da bacia (**Figura 16**), aponta para pequenas porções onde ocorrem chuvas intensas, evidenciadas pela coloração avermelhada no mapa, e que estão associadas com o alto potencial a erosão. Entretanto, mesmo com essas pequenas porções demonstrativas de chuvas intensas, a regime de chuvas como um todo é bastante elevado, variando de 214 mm/ano a 353 mm/ano.

Como resultado da combinação da Condutividade Hidráulica e da Precipitação Média Anual, obteve-se o mapa de Condutividade Hidráulica Ampliada (CHA), evidenciando na **Figura 17** áreas com coloração azulada e avermelhada, que representam áreas com alto potencial a erosão.







 b) SIF 4 - Condutividade Hidráulica Ampliada (CHA) + Cobertura da Vegetação (VEG) = CHAV.



Com o resultado do SIF 3, onde houve o cruzamento dos parâmetros Condutividade Hidráulica e Precipitação Média anual, obteve-se o parâmetro classificado como Condutividade Hidráulica Ampliada. Esse parâmetro foi utilizado como dado de entrada no SIF 4 e foi combinado com o parâmetro Cobertura da Vegetação (VEG).

Para o mapeamento da cobertura vegetal na área de estudo, utilizou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) aplicado sob as bandas 3 e 4 de uma imagem LandSat, e os valores apresentados no **Figura 18** abaixo indicam que valores negativos de NDVI próximos de zero (-0,1 a 0,1) geralmente correspondem a áreas rochosas ou de solo exposto, os baixos valores positivos representam arbustos e pastagens (aproximadamente 0,2 a 0,4), enquanto valores elevados indicam áreas florestadas (valores que se aproximam de 1). Na figura abaixo, a coloração avermelhada indica áreas de solo exposto ou áreas rochosas; a coloração amarela indica áreas de vegetação arbustiva ou pastagens; e a coloração esverdeada até a azulada indica áreas de vegetação arbustiva abaixo.

A combinação do mapeamento de cobertura vegetal – VEG (**Figura 18**) com o mapa Condutividade Hidráulica Ampliada- CHA (**Figura 17**), resultou no mapa denominado CHAV (**Figura 19**), onde a coloração azul e vermelha são indicativas de altos valores de Condutividade Hidráulica – CH (**Figura 15**), Precipitação Média Anual – PREC (**Figura 16**), e áreas desprovidas de vegetação, correspondendo as áreas com alto potencial à erosão dos solos (considerando esses três elementos).





c) SIF 5 - CHAV + Potencial de Umidade do Solo (PU) = Potencial de Escoamento Superficial (PES):



O último SIF deste grupo gerou o mapeamento do Potencial de Escoamento Superficial, e para isso utilizou-se como parâmetros aqueles que foram associados na composição do mapeamento do CHAV (**Figura 19**): Condutividade Hidráulica (CH), Precipitação Média Anual (PREC), e Cobertura da Vegetação (VEG), somados ao mapeamento do Potencial de Umidade dos solos (PU), que foi gerado a partir dos parâmetros: Índice de Umidade do solo (IU), Capacidade de Campo (CC), e Aspecto da Vertente (ASP).

Desta forma, observa-se algumas áreas com coloração esverdeada indicando regiões com baixo a médio potencial a erosão, extensas áreas com coloração azul indicando regiões com alto potencial a erosão, e pequenas porções da área de estudo apresentando coloração vermelha, que indica regiões com potencial a erosão muito alto.



- 63 -



3.3 - POTENCIAL DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE

O mapeamento do Potencial de Capacidade de Transporte foi realizado através da sobreposição de mapas temáticos com a aplicação de dois Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIF), SIF 6 e SIF 7.

a) <u>SIF 6</u>: Declividade (DEC) + Pedoforma da Encosta (PED) = Declividade Ampliada (DECA).



O terceiro grupo analisado contempla parâmetros que exercem alguma influência sobre a capacidade de transportar sedimentos, e que para este estudo convencionou-se chamar de Potencial de Capacidade de Transporte (PCT). A primeira combinação realizada neste grupo (SIF 6), considera os parâmetros Declividade (DEC) e Pedoforma da Encosta (PED).

A declividade influencia na capacidade de transporte de sedimentos e também na quantidade de perda de solo, pois quanto mais íngreme uma encosta maior a perda de solo decorrente do aumento na velocidade da água que não consegue ser armazenada. A **Figura 21** abaixo demonstra que poucas regiões com coloração amarelada – avermelhada possuem grande inclinação, chegando a 60 graus de inclinação, e que são consideradas áreas com grande potencial à erosão dos solos.

O parâmetro Pedoforma da Encosta (PED) representa a curvatura de uma superfície, e que podem ser convexa, côncava, ou plana. A curvatura de uma superfície afeta a aceleração e desaceleração do fluxo e, portanto, influencia a erosão e deposição de sedimentos. A curvatura convexa facilita a aceleração do fluxo e, portanto, aumenta o potencial de erosão dos solos. A **Figura 22**, demonstra que poucas regiões possuem uma curvatura côncava, especificamente àquelas adjacentes à talvegues e cursos d'água, e que está evidenciado pelo coloração azulada. A coloração mais amarelada indica regiões onde a curvatura da superfície é mais convexa e, consequentemente, com maior potencial a erosão.

A combinação desses dois fatores gerou o mapa chamado Declididade Ampliada (DECA), onde na **Figura 23** as regiões com coloração mais avermelhada indicam alto potencial à erosão dos solos.







 b) <u>SIF 7</u> - Declividade Ampliada (DECA) + Potencial de Escoamento Superficial (PES) = Potencial de Capacidade de Transporte (PCT).



O resultado do SIF 6 (DECA), que considerou os parâmetros Declividade (DEC) e Pedoforma da Encosta (PED), foi combinado com o resultado do SIF 5, onde gerou-se o mapa de Potencial de Escoamento Superficial – PES (**Figura 20**), para produzir o mapa de Potencial de Capacidade de Transporte (PCT).

O mapa apresentado na **Figura 24**, demonstra grandes áreas com alto grau de Potencial de Capacidade de Transporte (áreas avermelhadas), evidenciando que nessas áreas há grande risco à erosão dos solos. Observa-se também extensas áreas com coloração azulada, indicando regiões com Potencial de Capacidade de Transporte variando do grau médio ao alto e que também são sujeitas ao risco de erosão, e também várias áreas com coloração esverdeada que evidenciam áreas com baixo potencial ao escoamento superficial e à erosão dos solos.



Figura 24 -
3.4 - POTENCIAL DE EROSÃO DO SOLO

O mapeamento do Potencial de Erosão do Solo foi realizado através da sobreposição de mapas temáticos com a aplicação de dois Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIF), SIF 8 e SIF 9.

a) <u>SIF 8</u>: Densidade do Solo (DA) + Porosidade (PORO) = Textura do Solo (TEXSOL).



O último grupo de análise consiste na combinação de parâmetros de textura dos solos com os parâmetros geradores do mapa de Potencial de Capacidade de Transporte (PCT). A primeira análise, SIF 8, faz a combinação dos parâmetros Densidade Aparente (DA) e Porosidade Total (PORO) para a geração do mapa de Textura do Solo (TEXSOL).

O mapeamento da Densidade do Solo – DA (Figura 25) representa a quantidade de espaços porosos no solo em proporção ao volume ocupado pelos sólidos, sendo que elevados valores de densidade de volume indicam solos mais compactados e mais sujeitos à erosão dos solos. A Figura 25 abaixo apresenta, em rosa, as regiões com solos com densidade de volume mais elevados, demonstrando maior compactação dos solos, e consequentemente maior potencial à erosão. Por outro lado, as áreas com coloração mais esverdeadas contemplam as regiões onde o solo possui uma elevada proporção de espaços de poros em relação ao volume ocupado, com densidade aparente menor, e com baixo potencial à erosão.

Quanto maior a Densidade Aparente (DA), menor a Porosidade Total (PORO), e maior o escoamento superficial. A **Figura 26**, demonstra as áreas onde o solo possui maior Porosidade Total (vermelho) e menor porosidade (azul).

Dessa forma, o produto gerado da combinação desses dois parâmetros resultou no mapa de Textura do Solo – TEXSOL (**Figura 27**), onde as regiões com alto potencial à erosão são justamente aquelas com altos valores de densidade de volume e baixos valores de porosidade, evidenciados pela coloração avermelhada.







 b) <u>SIF 9</u>: Textura do Solo (TEXSOL) + Potencial de Capacidade de Transporte (PCT) = Potencial a Erosão (PE).



O produto final, onde é apresentado o potencial de erosão dos solos na área do alto e médio curso da bacia do Rio Macaé, é resultante da combinação do mapeamento da Textura dos Solos (TEXSOL) e do Potencial de Capacidade de Transporte (PCT).

Obviamente que o potencial de erosão é resultante de todos os parâmetros analisados nos três outros grupos, uma vez que o resultado final do mapeamento de cada grupo é utilizado na análise do grupo seguinte.

O mapa apresentado (**Figura 28**) aponta para regiões próximas ao exudório da bacia com alto potencial à erosão dos solos (coloração avermelhada), enquanto que as regiões de cabeceira indicam baixo potencial à erosão e que está evidenciado pela coloração esverdeada. Observa-se, entretanto, algumas manchas avermelhadas ao longo da bacia indicando alto potencial à erosão, e um pequena ponto esverdeado no centro da área de estudo, indicando aí baixo potencial de erosão dos solos.



Observa-se nos mapas resultantes de cada SIF que as formas geométricas de um ou de outro fator de entrada podem ser evidentes e parecerem contribuir em maior ou menor grau para o potencial à erosão dos solos, entretanto, o resultado final expressa a saída de um sistema de apoio à decisão, onde o valor de cada píxel é devido ao processamento de uma série de combinações e obedeceu a regras explícitas de decisão dentro dos sistemas de inferência *fuzzy* (SIFs). Cada píxel de saída tem a influência de todos os fatores de entrada, julgados relevantes na concepção do sistema.

Os dados de entrada para a avaliação do potencial de erosão dos solos considerou informações disponibilizadas publicamente, excetuando-se os dados de Densidade Aparente, Porosidade Total e Granulometria que foram mensurados através de coletas de amostras de solo na área de estudo e apresentados em Lima (2008). O produto final indica as regiões que reúnem relativamente fatores de promoção de processos erosivos, portanto, referentes aos dados de entrada utilizados. Nota-se, dessa forma, que o produto final se modificará no exato momento que se modifique a base de dados de entrada nos Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIFs).

O primeiro dado de entrada utilizado foi o parâmetro *Topographic Wetness Index*, denominado no presente estudo como Índice de Umidade (IU). Este índice é importante para modelar os processos relacionados com a topografia em encosta, isto porque pode quantificar o controle da topografia local sobre os processos hidrológicos e indicam a distribuição espacial da umidade do solo e a saturação da superfície.

O padrão espacial do Índice de Umidade está diretamente relacionado com o Modelo de Elevação Digital (DEM) utilizado no método de cálculo do algoritmo TWI. Diferentes resoluções espaciais do DEM irão gerar diferentes padrões do Índice de Umidade. Segundo Schmidt & Persson (2003), o método como o algoritmo calcula o acúmulo de fluxo (*flow accumulation*) também irá afetar o padrão do IU. O algoritmo TWI utiliza o método D8 (*deterministic eight-node*) no calculo do acúmulo de fluxo, onde o fluxo só é atribuído à célula circundante com o gradiente de inclinação mais acentuada para baixo (Haas, 2010).

Para Pei et. al. (2010), os índices de umidade usados na maioria dos estudos são calculados usando um único algorítimo de Direção de Fluxo (*FlowDirection*), que assume que toda a água de uma célula flui em apenas uma célula vizinha. Este

pressuposto não é sempre válido, especialmente em áreas com baixo relevo, onde o movimento de água pode ser divergente. Entretanto, esses mesmos autores afirmam que o índice de umidade é considerado um bom indicador da distribuição de umidade do solo em posições diferentes da paisagem onde o fluxo através da topografia domina processos de transporte de água. Entretanto, para Schmidt & Persson (2003), esse conceito só é válido para áreas com quantidade significativa de movimento lateral da água e fluxo vertical uniforme (ou seja, distribuição homogênea das condições do solo). Ainda segundo Schmidt & Persson (2003), células de saída que não recebem fluxo estão relacionadas a locais altos e também linhas de cumeadas. Áreas como depressões sem saída pode ser considerado como local para receber uma quantidade infinita de água. Esses problemas podem ser resolvidos com um pré-processamento do Modelo de Elevação Digital utilizado, onde as depressões são preenchidas. De acordo com Haas (2010), para o sucesso dos cálculos realizados pelo algorítimo TWI presume-se que todos os problemas envolvidos.

Haas (2010) preconiza que os modelos de elevação digital (DEMs) são amplamente utilizados em análises de problemas hidrológicos mas, são desvantajosos em alguns aspectos, isto porque (i) não conseguem representar decontinuidades na elevação; (ii) a resolução espacial afeta os resultados e eficiência computacional e; (iii) os fluxos gerados automaticamente tendem a ziguezague em vez de seguir as linhas de drenagem, tornando-se muito longos.

Para Sørensen & Seibert (2007), é possível avaliar as variações espaciais de propriedades hidrológicas, pedológicas e biológicas em uma paisagem a partir da informação contida nos mapas topográficos. A abordagem geral é a utilização de índices topográficos calculados a partir de modelos de elevação digital (DEMs) como uma medida do controle topográfico sobre o fluxo de água. Entretanto, os autores chamam a atenção para a dependência do cálculo do índice de umidade com a resolução espacial dos modelos de elevação digital, ao comparar resoluções de 30 e 90 metros, a média da área de inclinação é afetada. Este efeito é causado em parte pela diferença no tamanho do grid, e em parte pela diferença no conteúdo de informação do DEM. Ainda segundo Sørensen & Seibert (2007), dependendo da escala utilizada, a perda de informação pode ser de importância para a previsão hidrológica com base em índices topográficos. Dados bastante grosseiros podem não representar algumas características importantes de inclinação enquanto uma

resolução muito alta pode introduzir perturbações indesejáveis para direções de fluxo e ângulos de inclinação (Haas, 2010).

Questões associadas aos modelos de elevação também são apresentados em Grabs et. al. (2009), onde segundo os autores a topografia é muitas vezes um dos controles mais importantes sobre o padrão espacial das áreas saturadas, que por sua vez é fundamental para compreender grande parte dos processos hidrológicos. Para Grabs et. al. (2009), é provável que dados de entrada com resolução melhor possam afetar o desempenho dos índices de umidade, mas ainda é difícil prever de que forma os resultados iriam mudar, para os autores altas resoluções de DEM podem levar a valores altamente variáveis de declividade do terreno, que são estimativas irreais de gradientes hidráulicos.

De acordo com Kim (2012), as variações espaciais e temporais na umidade do solo são as principais características para a compreensão de processos hidrológicos em uma encosta, porque a umidade do solo está associada à dinâmica de infiltração, evapotranspiração, e vegetação. O impacto dos atributos topográficos sobre as variações na umidade do solo não é totalmente avaliada em função da resolução inconsistente de fatores, tais como os dados do terreno, heterogeneidade da textura do solo e vegetação em uma escala de bacias hidrográficas. As diferenças de resolução espacial de medições pontuais e modelo, bem como medições de umidade temporalmente irregulares do solo, também irão afetar a avaliação.

A hidrologia de encosta permanece um desafio, porque um número de processos interage em escalas diferentes, e contribuem significativamente para a complexidade do sistema que dificulta a possibilidade de uma teoria geral. Algumas das questões mais importantes incluem (i) a heterogeneidade horizontal e vertical dos diversos tipos de solos e várias propriedades do solo; (ii) redistribuição lateral de água ao longo da encosta e; (iii) geometria em três dimensões da encosta e presença de rugosidade e depressões (Lin et. al., 2006).

Observa-se desta forma que esse parâmetro deve ser analisado com precaução e seu uso deve ser precedido de pré-processamento do modelo de elevação digital. Haas (2010) sugere que a resolução adequada deve ser escolhida de acordo com os objetivos da modelagem, mas, infelizmente, é muitas vezes determinada pela disponibilidade de dados e aspectos econômicos. Dessa forma, considerando este índice importante dentro do modelo proposto, pode-se dizer que o

- 81 -

DEM utilizado (ASTER-GDEM), com 30 metros de resolução espacial, oferece os requisitos básicoa para servir como dado de entrada no algoritmo TWI.

O segundo dado de entrada utilizado, e que foi combinado com o Índice de Umidade (IU) no SIF 1, foi o parâmetro Capacidade de Campo (CC) que representa a capacidade do solo de reter água. O efeito das características do solo sobre a humidade do solo é representada pela Capacidade de Campo do solo em cada célula sendo que a retenção de água do solo varia consideravelmente com a textura do solo (Cohen et. al, 2008). Segundo Balland et. al. (2008), uma das propriedades que afetam o comportamento hidrológico dos solos é a Capacidade de Campo e mapear e modelar esse parâmetro é problemático porque esta propriedade varia fortemente com a mudança de textura do solo (silte, areia e argila), com o montante de fragmentos grosseiros, com a profundidade do solo, com o teor de matéria orgânica e, com a estrutura do solo. Como exemplo os autores citam que um aumento nos níveis de matéria orgânica no solo, geralmente pode aumentar o espaço de poros do solo e agregação do solo, afetando a Capacidade de Campo.

A medição precisa dos atributos de infiltração para a camada superficial do solo é fundamental para a compreensão da dinâmica da água no solo em resposta à chuva, pois as características de infiltração da superfície do solo determinam se a água da chuva se move através de escoamento superficial, se são armazenadas no solo, ou se contribuem para a drenagem de águas subterrâneas (Carrick et. al., 2011).

Conforme descrito no item 2.4 - Caracterização e Obtenção dos Dados, os dados de textura do solo (distribuição granulométrica das frações areia, silte e argila) utilizados para o cálculo da Capacidade de Campo foram obtidos através de coletas realizadas em campo pela equipe do LAGESSOLOS da UFRJ e apresentados em Lima (2008). Entretanto, mesmo esse parâmetro ter sido calculado através de dados coletados diretamente na área de estudo, sua espacialização no mapa está diretamente relacionada com dois fatores: (i) o *software* onde os dados de textura do solo foram aplicados para o cálculo da Capacidade de Campo e; (ii) o interpolador utilizado em ambiente SIG para a espacialização dos resultados.

O software aplicado para o cálculo da Capacidade de Campo foi o *Soil Water Characteristics* (http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm) desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em parceria com a Universidade do Estado de Washington. Para o desenvolvimento do software,

análises estatísticas foram conduzidas utilizando propriedades da água do solo mensuradas de uma grande variedade de solos provenientes do banco de dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). As equações foram formuladas com base em tensões de umidade do solo de 0,33kPA e 1.500kPA, e entrada de ar baseada nas variáveis de textura do solo e matéria orgânica. Essas análises estatísticas foram combinadas com equações de condutividade mais os efeitos de densidade, granulometria, e salinidade (Saxton & Rawls, 2006). Porém ressalte-se que para o cálculo desse parâmetro utilizou-se apenas dados de textura do solo e Saxton & Rawls (2006) sugerem que o cálculo teria mais eficiência adicionando-se dados de teor de matéria orgânica. Para os autores, a textura do solo é a propriedade mais importante para o comportamento hídrico do solo, no entanto, quatro variáveis adicionais (matéria orgânica, densidade, salinidade, cascalho) podem ter efeitos importantes. Como as equações derivadas baseiam-se em um mínimo de variáveis e uma média estatística, é provável que as soluções da equação possam variar um pouco por causa dos métodos de coleta ou dados laboratoriais (Saxton & Rawls, 2006). Lima (2008) descreve que as coletas foram feitas de acordo com alguns critérios, como a localização dos pontos a partir de imagens de satélite, o acesso a tais pontos de coleta, e a distribuição destes pontos na área de estudo, buscando a maior abrangência possível desta área.

A espacialização do resultado do cálculo da Capacidade de Campo (CC) no mapa foi realizada através do interpolador *Inverse Distance Weighted* – IDW (Distância Inversa Ponderada), que interpola uma superfície a partir de pontos utilizando uma técnica de distância inversa ponderada. Esse interpolador determina os valores das células utilizando uma combinação linear ponderada de um conjunto de pontos de amostra, onde o peso é uma função da distância inversa.

O IDW foi utilizado pois é o interpolador espacial mais simples e mais amplamente utilizado com base na correlação espacial entre os pontos dispersos. De acordo com Mito et. al. (2011), este método estima o valor em qualquer região não amostrada através da ponderação das amostras de dados disponíveis, através do inverso da distância entre o local de amostragem e os locais não amostrados (escalando os pesos para ser uma soma da unidade).

Diante do exposto, considerou-se que os resultados do cálculo do parâmetro Capacidade de Campo e sua espacialização no mapa foram satisfatórios para atender as demandas do modelo proposto. Entretanto, os cálculos podem ser

modificados dados pela adição de de teor de matéria orgânica e, consequentemente, alterar os resultados encontrados. Sugere-se que os cálculos realizados no software Soil Water Characteristics sejam acrescidos desses dados para refinamento dos resultados e por considerar que o teor de matéria orgânica influencia deterministicamente na indução de processos erosivos. Para Silva (2005), em função da ausência ou pouca quantidade de elementos agregadores, como a matéria orgânica, as estruturas particulares do solo apresentam elevados riscos à erosão.

O terceiro dado de entrada que faz parte do Conjunto 1 – Potencial de Umidade do Solo, foi o parâmetro Aspecto da Vertente (ASP), que representa a influência do fluxo da radiação solar na umidade do solo. A insolação potencial em uma encosta depende de vários fatores, dentre eles o Aspecto da Vertente, e pode ser calculado diretamente de modelos de elevação digital (Kunkel et. al., 2011). Com isso, todas as limitações discutidas anteriormente envolvendo os modelos de elevação digital devem ser consideradas aqui.

Para Rech et. al. (2001), existe importante correlação entre o Aspecto da Vertente e grau de intemperismo dos solos. Estudando diferentes solos em diferentes localizações nas vertentes em áreas no Arizona (EUA), os autores constataram que solos voltados para o sul possuem texturas mais finas e concentrações de cálcio no solo inferiores quando comparados com os solos voltados para o Norte. Ainda segundo Rech et. al. (2000), diferenças microclimáticas decorrentes do Aspecto da Vertente parece influenciar as taxas de intemperismo químico do solo e, consequentemente, sua textura.

De acordo com Wilkinson & Humphreys. (2006), esse parâmetro pode ser associado ao potencial à erosão dos solos, pois as diferenças na insolação podem variar de acordo com Aspecto da Vertente, formando assim um intervalo de microclimas em paisagens multifacetadas e, o microclima é frequentemente associado à umidade do solo e potencial de erosão. Em climas úmidos, os autores citam que faces voltadas para os polos são mais úmidas e possuem baixas taxas de erosão quando comparados com faces voltadas para o equador.

A inclinação e aspecto de uma vertente afeta fortemente a quantidade de radiação solar interceptada pel a superfície. A radiação solar é o componente dominante do balanço de energia de superfície e influencia fatores ecologicamente críticos de microclima, incluindo o teor de umidade do solo (Bennie et. al., 2008).

Embora a quantidade de nuvens e outros constituintes atmosféricos influenciem no volume de energia solar que alcança a superfície da Terra, a latitude exerce o principal controle sobre a quantidade de insolação que um determinado lugar recebe no decorrer do ano. Isso porque a variação do ângulo de incidência dos raios solares proporciona uma variação da área iluminada, dependendo da declinação do Sol, associada à latitude do lugar considerado. Machado et. al. (2009), descobriram que em vertentes na bacia do rio Veríssimo, no sul do estado de Goiás, as vertentes voltadas para nordeste, noroeste e norte recebem maior incidência dos raios solares e que, de 365 dias no ano, apenas 78 dias o sol ilumina as vertentes voltadas para o sul.

Diante do exposto, considerou-se nesse estudo que esse parâmetro também pode exercer influência na quantidade de chuvas que uma vertente recebe, pois, sendo a região de estudo parte constituinte da Serra do Mar e suas escarpas, suas faces voltadas para sul e sudoeste estão mais sujeitas às descargas orográficas e frentes frias provenientes do oceano. Esse padrão é facilmente detectado na fitofisionomia da vegetação onde, em suas faces voltadas para sul e sudoeste possuem características de Floresta Ombrófila e, em suas faces voltadas para norte e nordeste, ou seja, nas regiões denominadas de reversos da Serra do Mar, a vegetação apresenta padrão de Floresta Estacional.

O próximo parâmetro analisado, que serviu de dado de entrada para o SIF 2, foi a Condutividade Hidráulica (CH), que determina a capacidade de drenagem de um solo. A Condutividade Hidráulica está intimamente ligada com a capacidade da água em infiltrar-se em determinado solo e, segundo Botelho & Silva (2007), a determinação da quantidade de água que irá escoar pela superfície ou que irá infiltrar dependerá de diversos fatores como volume e intensidade da chuva, características das encostas, e propriedades dos solos.

A determinação da Condutividade Hidráulica (CH) no presente estudo utilizou dados de textura do solo (distribuição granulométrica das frações areia, silte e argila) que foram obtidos através de coletas realizadas em campo pela equipe do LAGESSOLOS da UFRJ (Lima 2008). Esses dados serviram de entrada no software *Soil Water Characteristics* e as formulações utilizadas pelo *software* para o cálculo dos parâmetros do solo se baseiam em Saxton & Rawls (2006).

Como descrito anteriormente para o parâmetro Capacidade de Campo (CC), a espacialização no mapa da Condutividade Hidráulica (CH) está diretamente relacionada ao *software* onde os dados de textura do solo foram aplicados para o cálculo e o interpolador utilizado em ambiente SIG para a espacialização dos resultados, e está sujeita as mesmas limitações descritas anteriormente.

Associa-se a estas limitações o fato desse parâmetro não ser facilmente mensurável. Inúmeros métodos são descritos na literatura e de acordo com Mesquita et. al. (2007), os valores de condutividade hidráulica em uma área específica podem ser muito distintos, assumindo grande amplitude total e elevados coeficientes de variação. Segundo Carvalho (2002) e Hurtado et. al. (2005), problemas metodológicos envolvidos na obtenção da condutividade hidráulica do solo, desde sua amostragem até sua determinação em laboratório e também em campo, podem levar a uma elevada variabilidade e grandes desvios entre os valores determinados.

Observa-se dessa forma que para o cálculo do parâmetro Condutividade Hidráulica (CH) existem inúmeros métodos e a aplicação da automatização através do software *Soil Water Characteristics* deve servir apenas como indicativo do valor de CH e na composição do SIF não pode receber grande relevância. Mas mesmo assim, optou-se por utilizar esse parâmetro pois, combinado à precipitação média e a cobertura vegetal pode-se inferir sobre o potencial de escoamento superficial.

O próximo dado de entrada do modelo foi Precipitação Média Anual (PREC), que pode ser considerado um dos principais desencadeadores dos processos erosivos. Para Guerra (2005), o início do processo erosivo se dá através da ação do *splash* (erosão por salpicamento das gotas da chuva), pois prepara as partículas que compõem o solo para serem transportadas pelo escoamento superficial. A ação das gotas de chuva causam a ruptura dos agregados do solo quando existentes, levando ao preenchimento dos poros e diminuindo a capacidade de infiltração do solo, promovendo a selagem da superfície.

De acordo com Ghahramani et. al. (2011), o entendimento do efeito das gotas da chuva nos solos é um passo importante para a explicação de processos erosivos em encostas, e para examinar os processos erosivos é necessário elucidar a importância do *splash*.

Para Wei et. al. (2010), a erosão dos solos causada pela ação da água constitui em uma das formas mais severas de erosão e, chuvas fortes ou maior média anual de precipitação podem contribuir de forma mais acentuada para a erosão dos solos.

Embora nesse estudo utilizou-se como dado de entrada a média das máximas anuais, Wei et. al. (2010) preconizam que especial atenção deve ser dada para o tipo e intensidade de precipitação, pois possuem forte relação com o aspecto da erosividade da chuva. De acordo com Jebari et. al. (2012), o fator erosividade da chuva pode ser considerado como o principal fator para estimar o potencial à erosão dos solos, mais do que outras variáveis ambientais.

Existem vários parâmetros que podem ser utilizados para medir a erosividade da chuva, como por exemplo: o total de precipitação, a intensidade da chuva, o momento e a energia cinética. Entretanto o mais utilizado para avaliar as perdas de solo é a energia cinética (Guerra, 2005).

Salienta-se dessa forma que a espacialização das chuvas no modelo referese exclusivamente a média anual das estações pluviométricas contempladas no estudo, não considerado outros aspectos relacionados com o fator de erosividade das chuvas. Importante ressaltar também que o interpolador utilizado, o IDW -*Inverse Distance Weighted*, apresenta as mesmas limitações já discutidas anteriormente.

Vários estudos, porém, afirmam que a relevância do efeito da chuva no processo erosivo está intimamente ligada a cobertura vegetal da superfície do terreno (Guerra, 2005; Zhou et. al., 2008; Mohammad & Adam, 2010; Wei et. al., 2010; Zhongming et. al., 2010; Ghahramani et. al., 2011; Cui et. al., 2012; Jebari et. al., 2012; Liu et. al., 2012). Terrenos florestados ou com algum tipo de cobertura, reduz o impacto da chuva na superfície e diminui o efeito do *splash*. Dessa forma, o parâmetro Cobertura Vegetal (VEG) serviu como dado de entrada do modelo. De acordo com Morgan (2005), a vegetação atua como uma camada protetora ou tampão entre a atmosfera e o solo. Os componentes acima do solo, tais como folhas e caules, absorvem a energia das gotas de chuva que caem, e a energia da água corrente, enquanto os componentes abaixo do solo, que compreende o sistema de raízes, contribuem para a resistência mecânica do solo.

Liu et. al. (2012) citam que inciativas para transformar áreas de agricultura abandonadas em áreas reflorestadas na China promoveu uma redução na geração do escoamento superficial e na erosão dos solos. Isto porque essa iniciativa aumentou a cobertura vegetal do solo, os teores de nutrientes do solo, e na recuperação das propriedades físicas do solo. Ainda segundo os autores, essas mudanças podem estar associadas ao aumento da evapotranspiração, na melhora da condutividade hidráulica e infiltração, e melhora a resistência dos solos à erosão.

Para Zhongming et. al. (2010), geralmente a erosão dos solos diminui à medida que a cobertura vegetal aumenta. Entretanto, os autores chamam a atenção para o fato de que o potencial de erosão em uma determinada área modifica de acordo com a tipologia e a estrutura da vegetação. Eles citam que florestas naturais são mais eficientes na redução do potencial à erosão do que florestas plantadas.

De acordo com Mohammad & Adam (2010), perdas na cobertura vegetal podem levar a selagem dos solos, que aumentam o escoamento superficial e o potencial à erosão. O dossel florestal tem a capacidade de interceptar água durante eventos de chuva, e a água interceptada volta para a atmosfera através do processo de evapotranspiração. As interações do dossel florestal reduzem energia cinética das gotas da chuva e protegem os solos (Cui et. al., 2012).

Corroborando os autores citados, a cobertura vegetal é um fator indispensável em qualquer modelo de avaliação do potencial de erosão dos solos, entretanto, o parâmetro Cobertura Vegetal (VEG) do modelo foi derivado da utilização do índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), o qual não considera as diferentes estruturas florestais bem como as estratificações vegetais perto do solo e as camadas de serra pilheira. Zhongming et. al. (2010) discutem que as camadas de serrapilheira são mais importantes na avaliação do potencial à erosão do que as camadas do dossel florestal.

Para Yao et. al. (2012) e Xu et. al. (2012), o NDVI é o índice mais comumente utilizado e está relacionado com variáveis biofísicas como a área foliar, cobertura do dossel, produtividade de clorofila, e fenologia da vegetação, e por isso constitui em um importante parâmetro de entrada para o presente estudo.

Outro parâmetro que serviu como dado de entrada no modelo foi o que avalia a inclinação da encosta, ou declividade (DEC). O mapa de declividade foi gerado através do modelo de elevação digital e apresenta as mesmas limitações discutidas anteriormente. Porém dados das características das encostas são de extrema importância para qualquer modelo que avalia o potencial de erosão dos solos e, juntamente com o parâmetro curvatura da encosta, compõem o grupo Capacidade de Transporte de sedimentos. De acordo com Bryan (2000), o transporte de sedimentos das vertentes para os vales onde ficam acessíveis para os processos fluviais é de central importância para a Geomorfologia, e vários processos erosivos estão ativos nas vertentes como, por exemplo, a formação de ravinas. O movimento inicial de uma partícula do solo pela força da água começa quando as forças que tendem a mover a partícula excedam as forças que resistem ao movimento. Em termos simples, existem três forças que atuam sobre a partícula: (i) a força vertical ou peso movendo a partícula verticalmente para baixo em direcção à superfície do solo; (ii) a força de elevação que tende a fazer a ascensão da partícula verticalmente e; (iii) da força de arrasto exercida pelo fluxo da água movendo a partícula horizontalmente ao longo da superfície. As proporções relativas dessas três forças dependem do ângulo de inclinação (Morgan, 2005).

Muitos estudos apontam ou descrevem a importância da declividade para os processos erosivos (Gabriels, 1999; Bryan, 2000; Guerra & Marçal, 2006; Guerra & Mendonça, 2007; Fu et. al., 2011; Zhu et. al., 2011; Pelletier, 2012). Após cessada a capacidade de armazenar água do solo, esta tende a escorrer superficialmente, e sua velocidade é influenciada diretamente pela declividade. Gabriels (1999) preconiza que quanto mais íngreme uma encosta maior a perda de solo, pois aumenta a velocidade do escoamento superficial da água, e também cita inúmeros estudos que encontraram uma relação exponencial entre perda de solo e gradiente de inclinação da encosta. Corroborando Gabriels (1999), Morgan (2005) defende que a erosão pode aumentar com o aumento do grau de inclinação e comprimento do declive, como resultado dos aumentos respectivos na velocidade e volume de escoamento superficial. Entretanto, Guerra & Mendonça (2007) citam que a declividade pode ser um fator importante para o precesso erosivo, mas não há necesariamente uma correlação positiva à medida que a declividade aumenta, pois em encostas muito íngremes a erosão pode diminuir devido ao decréscimo de material disponível.

Segundo Fu et. al. (2011), declividade é um fator de grande influência na desagregação do solo e transporte de partículas, especialmente em áreas entre ravinas (*interrill*).

Ressalta-se que o modelo proposto nesse estudo apenas utiliza a variação de inclinação da encosta, sem levar em consideração a distância da inclinação. De acordo com Gabriels (1999), a erosão de ravinas (*rill*) é insignificante em declives com distâncias inferiores a 4,5 metros e que a erosão entreravinas (*interrill*) é independente do comprimento de declive. Desta forma, o mapeamento da

declividade neste estudo contempla apenas a variação da inclinação, e deve ser avaliado apenas sobre esse aspecto e como participa no processo erosivo.

O parâmetro combinado com a declividade foi o que analisa a curvatura da superfície, e que nesse estudo chamou-se de Pedoforma da Encosta (PED). Este parâmetro indica se uma superfície é côncava ou convexa, onde nas superfícies convexas está o maior potencial à erosão. Para o mapeamento desse parâmetro utilizou-se o modelo de elevação digital ASTER-GDEM, e todas as limitações associadas à esse dado, discutidas anteriormente, também se aplicam aqui.

Zevenbergen & Thorne (1987), apontam para dois tipos de curvatura da superfície (pedoforma da encosta), uma curvatura na direção do gradiente de declividade (*profile curvature* – curvatura do perfil) e outra transversal (*plan curvature* – curvatura plana). Para o presente estudo considerou-se apenas a curvatura na direção do gradiente de declividade, pois influencia na taxa de variação da inclinação, afeta aceleração do fluxo e, portanto, influencia o assoreamento e a degradação (Zevenbergen & Thorne, 1987). Para Moore et. al. (1991) e Romstad & Etzelmüller (2012), a curvatura do perfil se refere a aceleração do fluxo é convergente ou divergente e a relação com a umidade do solo. Dessa forma, a curvatura do perfil (*profile curvature*) é um importante determinante dos processos de erosão e deposição em uma vertente (Moore et. al., 1991), e por esta razão foi considerado no modelo.

Jenness (2012) descreve a curvatura do perfil como sendo a curvatura ao longo da linha de inclinação máxima, em que a superfície é interseptada com o plano formado pelo aspecto e o eixo Z. Os valores indicam se o fluxo de substâncias irá acelerar ou desacelerar à medida que fluem sobre a curvatura.

O mecanismo de acumulação reflete os fluxos de desaceleração relativa. Em partes côncavas de um perfil de encosta, a declividade diminui vertente abaixo. Regiões mais altas no perfil da encosta são mais íngremes e, portanto, partículas localizadas, podem se mover mais rápido do que aquelas situadas abaixo. Como resultado, os fluxos de materiais sofrem desaceleração relativa sobre as partes da superfície, e aceleração relativasobre os outros (Shary et. al., 2002).

O algoritmo utilizado no programa ArcGis para a derivação da curvatura é baseado em Zevenbergen & Thorne (1987) e só permite o cálculo de duas curvaturas, entretanto alguns autores (Florinsky, 1998 e Jenness, 2012) citam que

esse algoritmo tem melhores resultados com modelos de elevação de alta resolução, e sugerem a utilização do algoritmo baseado em Evans (1979).

Interessante observação feita por Schmidt & Hewitt (2004) deve ser considerada, onde para os autores a metodologia para modelar os elementos da terra (pequenas áreas de superfície da terra que são uniformes em parâmetros geomorfométricos, tais como a inclinação, rugosidade da superfície de contorno, e curvatura do perfil) deve ser implementada em duas etapas: em primeiro lugar, os elementos de formadores são classificados com base na geometria local, e em segundo lugar, os elementos da terra são derivados através da avaliação dos elementos formadores em seu contexto na paisagem. De acordo com essa perspectiva, nota-se que no presente estudo os elementos topográficos derivados do modelo de elevação digital apenas contempla sua geometria local sem levar em consideração su contexto na paisagem. Para Schmidt & Hewitt (2004), os elementos derivados dos modelos de elevação digital deveriam ser reclassificados de acordo com seu contexto geomorfométrico usando uma escala maior e sua posição no terreno.

Os dois últimos parâmetros pertencentes ao modelo são referentes aos aspectos texturais do solo: Densidade Aparente e Porosidade Total. Esses parâmetros foram calculados diretamente de coletas feitas em campo, de acordo com o descrito em Lima (2008), e a única ressalva está no fato que a espacialização desses parâmetros foi realizada através da utilização do interpolador IDW (*Inverse Distance Weighted* – Distância Inversa Ponderada) e, portanto, contemplando as limitações inerentes desse algoritmo e que foram discutidas anteriormente nesse capítulo.

Os resultados obtidos no modelo proposto foram comparados com os de Lima (2008), visto que este autor realizou estudo na mesma região. Entretanto, ressaltase que os estudos utilizaram metodologias distintas, porém com o mesmo objetivo: avaliar o potencial de erosão dos solos no alto e médio curso da bacia do rio Macaé – RJ. A principal diferença dos estudos está no fato que em Lima (2008) os resultados foram apresentados de forma pontual de acordo com os pontos de coleta de solos, enquanto que no presente estudo os resultados foram apresentados espacialmente na região de estudo. Outra diferença importante diz respeito aos parâmetros utilizados, que não coincidem totalmente nos trabalhos. Dos 54 pontos amostrados em Lima (2008), apenas 43 são contemplados na área de abrangência deste estudo, e a comparação entre os resultados são apresentados a seguir:

AMOSTRA DO SOLO	LIMA (2008)	PRESENTE ESTUDO
1	Α	-
2	Α	-
3	Α	-
4	М	-
5	Α	-
6	М	-
7	Α	-
8	Α	-
9	М	-
10	М	-
11	М	-
12	М	A
13	Α	М
14	М	A
15	Α	A
16	М	A
17	М	A
18	М	A
19	Α	A
20	М	М
21	Α	М
22	Α	М
23	М	М
24	М	М
25	М	М
26	М	М
27	Α	A
28	A	A
29	A	М
30	М	М
31	М	М
32	М	A
33	М	В
34	М	М
35	Α	А
36	М	М
37	Α	А

Quadro 3 – Comparação dos resultados do potencial de erosão dos solos na área de estudo (A = alto potencial de erosão; M = médio potencial de erosão; e B = baixo potencial de erosão).

38	М	М
39	М	М
40	М	М
41	М	М
42	М	A
43	Α	М
44	М	М
45	Α	A
46	М	В
47	Α	В
48	Α	В
49	М	М
50	Α	М
51	М	М
52	М	М
53	М	М
54	М	М

O quadro acima mostra que dos 43 pontos em comum 60,5% são coincidentes, e 39,5 apresentaram resultados divergentes. Especial atenção se dá quando observados os resultados dos pontos 47 e 48 que em Lima (2008) foram considerados como sendo de alto potencial de erosão, e no presente estudo foram considerados como baixo potencial.

Dessa forma, pode-se afirmar que a comparação realizada serve como validação do sistema de inferência *fuzzy* proposto.

4 - CONCLUSÕES

O resultado final do presente estudo expressa a saída de um sistema de apoio à decisão, onde o valor de cada píxel é devido ao processamento de uma série de combinações e obedeceu a regras explícitas de decisão dentro dos sistemas de inferência *fuzzy* (SIFs). Cada píxel de saída tem a influência de todos os fatores de entrada, julgados relevantes na concepção do sistema. O produto final indica as regiões que reúnem mais ou menos fatores de promoção de processos erosivos e, portanto, referentes aos dados de entrada utilizados.

Conclui-se, então, que no presente estudo dados temáticos indicadores de processos erosivos puderam ser organizados dentro de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), e serviram de base na elaboração do modelo baseado na teoria do conjunto e da lógica *fuzzy* para avaliação do potencial de erosão dos solos no alto e médio curso da bacia do rio Macaé – RJ.

Considerando os estudos realizados por Lima (2008), pode-se afirmar que esse sistema serve de apoio à tomada de decisão a partir da avaliação do potencial de erosão dos solos.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, o resultado final do modelo proposto poderia ser refinado com a adoção de mais algumas etapas no processamento, como por exemplo:

- a) Substituição do mapeamento de cobertura vegetal por um mapeamento do uso e cobertura do solo, pois dessa forma entraria também a variável de práticas de manejo agrosilvopastoris adotadas na região e que possam influenciar no potencial à erosão.
- b) Cálculo de várias curvaturas da superfície (pedoforma da encosta), e avaliação da curvatura que mais tenha relação com os processos erosivos.
- c) Acrescentar nas análises do solo a ser coletado o teor de matéria orgânica, pois esse parâmetro influencia nos agregados dos solos, tendo relação direta com os processos erosivos. Além disso, o *software* utilizado para o cálculo da condutividade hidráulica e capacidade de campo, tem maior desempenho com a entrada de dados de teor de matéria orgânica.
- d) Substituição do interpolador IDW para os parâmetros referentes aos dados do solo como, por exemplo, o Kriging.
- e) Comparar os resultados do modelo com verificação *in situ*, para melhor avaliação dos resultados.

Mesmo com todas as limitações do modelo apontadas neste estudo, acreditase que o resultado final é um bom indicativo de áreas com potencial à erosão dos solos, e pode ser utilizado para tomada de decisão na elaboração de planos e programas de prevenção e controle da erosão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Disponível em http://hidroweb.ana.gov.br/. Acesso em 06 de janeiro de 2012.

ALBERTS, E. E.; HOLZHEY, C. S.; WEST, L. T.; NORDIN, J. O. *Soil Selection: USDA water erosion prediction project (WEPP)*. Paper No. 87-2542, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI 1987.

ARAUJO, G. H. de S.; de ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. *Gestão Ambiental De Áreas Degradadas*. Rio de Janeiro, Editora Bertrand, 2005.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. *SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling* Hydrological Processes, 19 (3), p.563-572. 2005.

ASTER GLOBAL DIGITATION ELEVATION MODEL – GDEM. Disponível em: http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>. Acesso em 06 de janeiro de 2012.

BALLAND, V.; POLLACCO, J. A. P.; ARP, P. A. *Modeling Soil Hydraulic Properties For a Wide Range of Soil Conditions*. Ecological Modelling, 219, p.300-316. 2008.

BARRETO-NETO, A. A.; SOUZA FILHO, C. R. de. *Application Of Fuzzy Logic To The Evaluation Of Runoff In A Tropical Watershed*. Environmental Modeling & Software, 23, p.244-253. 2008.

BENNIE, J.; HUNTLEY, B.; WILTSHIRE, A.; HILL, M. O.; BAXTER, R. Slope, Aspect and Climate: Spatially Explicit and Implicit Models of Topographic Microclimate in Chalk Grassland. Ecological Modelling, 216, p.47-59. 2008.

BORBA, J. A.; MURCIA, F. D. R.; SOUTO MAIOR, C. D. *Fuzzy ABC: Modelando a Incerteza na Alocação dos Custos Ambientais*. RBGN, São Paulo, v. 9, n. 24, p. 60-74. 2007.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. *Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental*. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org), Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil. Bertrand Brasil, 2a ed., Rio de Janeiro, p.153-188. 2007.

BRADY, N. C. *The Nature And Properties Of Soils*. Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo, 7^a ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 878 pgs. 1989.

BRYAN, R. B. *Soil Erodibility and Processes of Water Erosion on Hillslope*. Geomorphology, 32, p. 385-415. 2000.

CARRICK, S.; BUCHAN, G.; ALMOND, P.; SMITH, N. *Atypical Early-time Infiltration Into a Structured Soil Near Field Capacity: The Dynamic Interplay Between Sorptivity, Hydrophobicity, and Air Encapsulation*. Geoderma, 160, p. 579-589. 2011.

CARVALHO, L. A. Condutividade Hidráulica do Solo no Campo: As Simplificações do Método do Perfil Instantâneo. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, S.P., 2002.

CERDAN, O.; GOVERS, G.; LE BISSONNAIS, Y.; VAN OOST, K.; POESEN, J.; SABY, N.; GOBIN, A.; VACCA, A.; QUINTON, J.; AUERSWALD, K.; KLIK, A.; KWAAD, F. J. P. M.; RACLOT, D.; IONITA, I.; REJMAN, J.; ROUSSEVA, S.; MUXART, T.; ROXO, M. J.; DOSTAL, T. *Rates and Spatial Variations of Soil Erosion in Europe: A Study Based on Erosion Plot Data*. Geomorphology, 122, p. 167-177. 2010.

CIDE, Fundação. Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro – Informações do Território – Divisão Territorial. Disponível em: <http://www.cide.rj.gov.br/divisao_regional.php>. Acesso em: 29/10/2009.

COHEN, S.; SVORAY, T.; LARONNE, J. B.; ALEXANDROV, Y. Fuzzy-Based Dynamic Soil Erosion Model (FuDSEM): Modelling Approach And Preliminary Evaluation. Journal of Hydrology, 356, p. 185-198. 2008.

CUI, X.; LIU, S.; WEI, X. *Impacts of Forest Changes on Hydrology: A Case Study of Large Watersheds in the Upper Reach of Yangtze River Basin*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss, 9, p. 6507-6531. 2012.

DANTAS, M. E. *Mapa Geomorfológico do Estado do Estado do Rio de Janeiro*. Brasília: CPRM, Escala:1:250.000. 2000.

ESWARAN, H.; LAL, R.; REICH, P. F. *Land Degradation: An Overview*. In: BRIDGES, E. M.; HANNAM, I. D.; OLDEMAN, L. R.; PENING DE VRIES, F. W. T.; SCHERR, S. J.; and SOMPATPANIT, S. (eds.). Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification, Khon Kaen, Thailand. Oxford Press, New Delhi, India. 2001. EVANS, I.S. *An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping*. Final report on grant DA-ERO-591-73-G0040. University of Durham, England. 1979.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. *Determinação de Capacidade de Campo In Situ ou Através de Equações de Regressão*. Pesq. Agropec. Bras. Brasília. v.35, n 5, p. 1029-1036. 2000.

FLORINSKY, I.V. *Derivation of Topographic Variables from a Digital Elevation Model Given by a Spheroidal Trapezoidal Grid.* International Journal of Geographical Information Science, 12: 8, 829 – 852. 1998.

FRANÇA, A.; de SOUZA, F. J.; MARQUES, M. Avaliação Do Potencial À Erosão Dos Solos: Uma Análise por Lógica Fuzzy e Sistemas De Informações Gegráficas. In: 23° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Campo Grande, MS. 2005.

FU, S.; LIU, B.; LIU, H.; XU, L. *The Effect of Slope on Interrill Erosion at Short Slopes*. Catena, 84, p. 29-34. 2011.

GABRIELS, D. The Effect of Slope Length on the Amount and Size Distribution of Eroded Silt Loam Soils: Short Slope Laboratory Experiments on Interrill Erosion. Geomorphology, 28, p. 169-172. 1999.

GHAHRAMANI, A.; ISHIKAWA, Y.; GOMI, T.; SHIRAKI, K.; MIYATA, S. *Effect of Ground Cover on Splash and Sheetwash Erosion over a Steep Forested Hillslope: A Plot-Scale Study*. Catena, 85, p. 34-47. 2011.

GOMIDE, F.; GUDWIN, R.; TANSCHEIT, R. *Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações*. In: Proc. 6th IFSA CONGRESS – Tutorials, p. 1-38, São Paulo, Brasil. 1995.

GRABS, T; SEIBERT, J; BISHOP, K; LAUDON, H. *Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model.* Journal of Hydrology, 373, p. 15-23. 2009.

GUERRA, A. J. T. *Processos Erosivos nas Encostas*. In: GUERRA, A.J.T. & BAPTISTA, S. (Org), Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Bertrand Brasil, 4a ed., Rio de Janeiro, p.149-195. 2001.

GUERRA, A. J. T. *O Início do Processo Erosivo*. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org), Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações. Bertrand Brasil, 2a ed., Rio de Janeiro, p.17-50. 2005.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. *Geomorfologia Ambiental*. Bertrand Brasil, 1a ed., Rio de Janeiro. 2007.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. *Erosão dos Solos e a Questão Ambiental*. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org), Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil. Bertrand Brasil, 2a ed., Rio de Janeiro, p.153-188. 2007.

HAAS, J. Soil Moisture Modelling Using TWI and Satellite Imagery in the Stockholm *Region.* Master of Science Thesis in Geoinformatics. School of Architecture and the Built Environment. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2010.

HURTADO, A. L. B; CICHOTA, R; VAN LIER, Q. J. *Parametrização do Método do Perfil Instantâneo para a Determinação da Condutividade Hidráulica do Solo em Experimentos com Evaporação*. R. Bras. Ci. Solo, 29: 301-307, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Site da coordenação de zoneamento ambiental. <http://www.ibama.gov.br/zoneamento-ambiental>. Acessado em 29/10/2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Disponível em http://www.dgi.inpe.br/CDSR/. Acessado em 07/03/2010.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Orientação para o Combate a Erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe-Parapanema*. São Paulo, v.6, n. 24 739, 1986.

JAMEL, C. E. G. Aplicação de Avaliação Multi-critério e Inferidores Baseados em Lógica Nebulosa no Apoio ao Zoneamento de Unidades de Conservação Ambiental. 2010. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, R.J., 2010.

JEBARI, S. B; BERNDTSSON, R; OLSSON, J.; BAHRI, A. *Soil Erosion Estimation Based on Rainfall Disaggregation*. Journal of Hydrology, 436 - 437, p. 102-110. 2012.

JENNESS, J. *DEM Surface Tools*. Jenness Enterprises. Disponível em: http://www.jennessent.com/arcgis/surface_area.htm>. Acesso 08 de julho de 2012.

KIEHL, J. E. Manual de Edafologia. Agronômica. Ceres, São Paulo, 262 p. 1979.

KIM, S. *Characterization of annual soil moisture response pattern on a hillslope in Bongsunsa Watershed, South Korea*. Journal of Hydrology, 448 - 449, p. 100-111. 2012.

KUNKEL, M. L.; FLORES, A. N.; SMITH, T. J.; McNAMARA, P.; BENNER, S. J. A Simplified Approach for Estimating Soil Carbon and Nitrogen Stocks in Semi-Arid Complex Terrain. Geoderma, 165, p. 1-11. 2011.

LEITE, N. B. F. Associação da Análise Booleana e Lógica Fuzzy ao Sistema de Informação Geográfica Aplicados a Planos Diretores. Estudo de Caso: Ponte Nova, *MG*. Tese Doutorado. Programa de Pós Graduação Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 2004.

LEPSCH, I. F. *Formação e Conservação dos Solos*. São Paulo – SP. Oficina de textos. 2002.

LIMA, L. D. da M. *Suscetibilidade à Erosão dos Solos nas Sub Bacias do Médio e Alto Cursos da Bacia do Rio Macaé / RJ.* 2008. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, R.J., 2008.

LIN, H. S.; KOGELMANN, W.; WALKER, C.; BRUNS, M. A. Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydropedological perspective. Geoderma, 131, p. 345-368. 2006.

LIU, Y.; FU, B.; LU, Y.; WANG, Z.; GAO, G *Hydrological Responses and Soil Erosion Potential of Abandoned Cropland in the Loess Plateau, China*. Geomorphology, 138, p. 404-414. 2012.

LOBÃO, J. S. B.; ROCHA, W. de J. S. da F; SILVA, A. de B. *Utilização De Lógica Fuzzy Na Modelagem De Vulnerabilidade À Erosão No Município de Morro Chapéu* – *BA*. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, Anais, Aracaju – SE. 2006.

LOCH, R. E. N. *Cartografia: Representação, Comunicação E Visualização De Dados Especiais.* Ed. da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC. 2006.

MACHADO, L. E. G.; NUNES, E. D.; ROMÃO, P. A. Análise da Influência da Topografia na Variação Sazonal de Fitofisionomias na Bacia Do Rio Veríssimo – Go. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Anais, Natal, Brasil. 2009. MAMDANI, E. H. *Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant.* Proceedings of the IEE (Control and Science), v. 121, p. 298-316. 1974.

MEIRELLES, M. S. P. Análise Integrada do Ambiente Através de Geoprocessamento – Uma Proposta Metodológica Para Elaboração de Zoneamentos. 1997. 174 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, R.J., 1997.

MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CAMARA, G. *Técnicas De Inferência Espacial. in*: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; de ALMEIDA, C. M. (eds.). Geomatica: Modelos e Aplicações Ambientais. EMBRAPA Informações Tecnológicas, Brasília, DF. 2007.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O.; PERUCHI, F.; TEREZA, M. C. Alternativa para Caracterização da Condutividade Hidráulica Saturada do Solo Utilizando *Probabilidade de Ocorrência*. Ciênc. Agrotec., Lavras, v. 31, n. 6, p. 1605-1609. 2007.

METTERNICHT, G.; GONZALEZ, S. *FUERO: Foundations of a Fuzzy Exploratory Model for Soil Erosion Hazard Prediction*. Environmental Modelling & Software, 20, p. 715-728. 2005.

MISHINA, K. D. V.; SILVA, J. F. da; SILVA, J. B. de A. *Modelo para Avaliação Qualitativa do Risco em Oleodutos Através da Lógica Fuzzy Segundo a Metodologia da IBR*. In: 17º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2006.

MITO, Y.; ISMAIL, M. A. M.; YAMAMOTO, T. *Multidimensional Scaling and Inverse Distance Weighting Transform for Image Processing of Hydrogeological Structure in Rock Mass.* Journal of Hydrology, 411, p.25-36. 2011.

MITRA, B.; SCOTT, H. D.; DIXON, J. C.; McKIMMEY, J. M. *Applications Of Fuzzy Logic To The Prediction Of Soil Erosion In A Large Watershed*. Geoderma, 86, p.183-209. 1998.

MOHAMMAD, A. G.; ADAM, M. A. *The Impact of Vegetative Cover Type on Runoff and Soil Erosion under Different Land Uses*. Catena, 81, p.97-103. 2010.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. *Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications*. Hydrological Processes, v. 5, p.3-30. 1991.

MORGAN, R. P. C. *Soil Erosion and Conservation*. Third Edition. National Soil Resources Institute, Cranfield University.2005.

PEI, T.; QUIN, C.; ZHU, A.; YANG, L.; LUO, M.; LI, B.; ZHOU, C. *Mapping Soil Organic Matter Using the Topographic Wetness Index: A Comparative Study Based on Different Flow-direction Algorithms and Kriging Methods*. Ecological Indicators, 10, p. 610-619. 2010.

PELLETIER, J. D. *Fluvial and Slope Wash Erosion of Soil Mantled Landscapes: Detachment or Transport Limited?* Earth Surface Processes and Landforms 37, 37–51. 2012.

PRATO, T. *A Fuzzy Logic Approach For Evaluating Ecosystem Sustainability*. Ecological Modelling, 187, p.361-368. 2005.

RECH, J. A.; REEVES, R. W.; HENDRICKS, D. M. *The Influence of Slope Aspect on Soil Weathering Processes in the Springerville Volcanic Field, Arizona*. Catena, 43, p. 49-62. 2011.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; YODER, D. C.; McCOOL, D. K. *RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future*. Journal of Soil and Water Conservation, 49 (3), p. 213–220. 1994.

RESENDE, M. N. *Aplicações de Conhecimentos Pedológicos à Conservação de Solos*. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 11, n.128, p. 3-18, 1985.

ROBINSON, V. B. A Perspective On The Fundamentals Of Fuzzy Sets And Their Use In Geographic Information Systems. Transactions in GIS, 7(1): 3-30. 2003.

ROMSTAD, B.; ETZELMULLER, B. *Mean-curvature Watersheds: A Simple Method for Segmentation of a Digital Elevation Model into Terrain Units*. Geomorphology, 139-140, p.293-302. 2012.

ROSA, R. *Sistema de Informações Geográficas*. Laboratório de Geoprocessamento – Universidade Federal de Uberlândia. 2002.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 70, p. 1569-1578. 2006.

SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy Land Element Classification from DTMS Based on Geometry and Terrain Position. Geoderma, 121, p. 243-256. 2004.

SCHMIDT, F.; PERSSON, A. *Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Indices*. Precision Agriculture, 4, p. 179-192. 2003.

SELBY, M. J. & HODDER, A. P. W. *Hillslope Materials and Processes*. Segunda Edição, Impresso na Universidade de Oxford – EUA. 1993.

SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. *Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis*. Geoderma, 107, p. 1-32. 2002.

SILVA, A. S. *Análise Morfológica dos Solos e Erosão*. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org), Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações. Bertrand Brasil, 2a ed., Rio de Janeiro, p.17-50. 2005.

SILVA, L. C. & CUNHA, H. C. S. Geologia do Estado do Rio de Janeiro. CPRM. 2001.

SOIL WATER CHARACTERISTICS. Hydraulic Properties Calculator. Disponível em http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm. Acesso 06 de janeiro de 2012.

SØRENSEN, R.; SEIBERT, J. *Effects of DEM Resolution on the Calculation of Topographical Indices: TWI and its Components*. Journal of Hydrology, 347, p. 79-89. 2007.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. *Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control*. IEEE Trans. on Systems, Man & Cybernetics, v. 15, p. 116-132. 1985.

TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX. Disponível em: < http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=16750>. Acesso 06 de janeiro de 2012.

TRAN, L. T.; RIDGLEY, M. A.; DUCKSTEIN, L.; SUTHERLAND, R. Application Of Fuzzy Logic-Based Modeling To Improve The Performance Of The Revised Universal Soil Loss Equation. Catena, 47, p.203-226. 2002.

XAVIER DA SILVA, J. *Geomorfologia e Geoprocessamento in:* GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (Orgs.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1994.

WEI, W.; CHEN, L.; FU, B.; CHEN, J. Water Erosion Response to Rainfall and Land Use in Different Drought-Level Years in a Loess Hilly Area of China. Catena, 81, p.24-31. 2010.

WERLAND, M. K. Configuração Da Rede De Drenagem E Modelado Do Relevo: Conformação Da Paisagem Na Zona De Transição Da Bacia Do Paraná Na Depressão Central Do Rio Grande Do Sul. 2004. 207 f. Tese (Doutorado. em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. 2004.

WILKINSON, M. T.; HUMPHREYS, G. F. Slope Aspect, Slope Length and Slope Inclination Controls of Shallow Soils Vegetated by Sclerophyllous Heath—Links to Long-Term Landscape Evolution. Geomorphology, 76, p.347-362. 2006.

WISCHMEIER, W. H.; Smith, D. D. *Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook No. 537. U.S. Gov Print. Office, Washington, D. C. 1978.

XU, C.; LI, Y.; HU, J.; YANG, X.; SHENG, S.; LIU, M. Evaluating the Difference Between the Normalized Difference Vegetation Index and Net Primary Productivity as the Indicators of Vegetation Vigor Assessment at Landscape Scale. Environ Monit Assess, 184, 1275–1286. 2012.

YAO, J.; HE, X. Y.; LI, X. Y.; CHEN, W.; TAO, D. L. *Monitoring Responses of Forest to Climate Variations by MODIS NDVI: A Case Study of Hun River Upstream, Northeastern China*. Eur J Forest Res, 131, 705–716. 2012.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, p. 338-353. 1965.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. *Quantitative Analysis of Land Surface Topography*. Earth Surface Processes and Landforms, v. 12, p.47-56. 1987.

ZHONGMING, W.; LEES, B. G.; FENG, J.; WANNING, L.; HAIJING, S. *Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion.* Catena, 83, p.87-93. 2010.

ZHOU, P.; LUUKKANEN, O.; TOKOLA, T.; NIEMINEN, J. *Effect of Vegetation Cover on Soil Erosion in a Mountainous Watershed*. Catena, 75, p. 319-325. 2008.

ZHU, M.; TAN, S.; DANG, H.; ZHANG, Q. *Rare Earth Elements Tracing the Soil Erosion Processes on Slope Surface Under Natural Rainfall*. Journal of Environmental Radioactivity, 102, p. 1078-1084. 2011.

APÊNDICE A – Algoritmo do Script *Topographic Wetness Index*:

```
# Created By: Prasad A Pathak
# Purpose: Calculate Topographic Wetness Index: natural logarithm of area divided
by slope
# It indicates the probable water saturation level of the ground
# By default, ArcGIS calculates slope by considering just 3 X 3 neighborhood
# For this index a slope is calculated from the topmost pixel to any particular pixel is
needed
# This is acheived by calculating the minimum elevation raster
# Import system modules
import sys, string, os, arcgisscripting
# Geoprocessor object
gp = arcgisscripting.create
gp.overwriteoutput = 1
# Check out license for Spatial Analyst
gp.CheckOutExtension ("spatial")
# Load toolboxe
gp.AddToolbox ("C:/Program Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Spatial Analyst
Tools.tbx")
# Get the name of folder
gp.workspace = gp.GetParameterAsText (0)
#Input DEM
InDEM = gp.GetParameterAsText(1)
#Output TWI raster
OutTWI = gp.GetParameterAsText(2)
# Variables used
Output_surface_raster = gp.workspace + "/eldodem_fill"
Output_flow_direction_raster = gp.workspace + "/eldodem_flw"
Output_drop_raster = gp.workspace + "/eldodem_drp"
Output_accumulation_raster = gp.workspace + "/eldodem_acc"
Output_Plus_raster = gp.workspace + "/eldodempls"
Output Times raster = gp.workspace + "/eldodemtim"
```

Output_Mean_elev_raster = gp.workspace + "/mean_elev" Output_edrop = gp.workspace + "/edrop" Out change = gp.workspace + "/change elev" *Out_distance = gp.workspace + "/distance"* Out slope = gp.workspace + "/slope" *Out_preatan = gp.workspace + "/preatan"* # Fill DEM to make it depressionless gp.Fill sa(InDEM, Output surface raster, "") print "DEM filled" gp.addmessage ("DEM filled") # Flow Direction gp.FlowDirection_sa (Output_surface_raster, Output_flow_direction_raster, "NORMAL", Output_drop_raster) print "Flow direction raster created successfully" gp.addmessage ("Flow direction raster created successfully") # Flow Accumulation gp.FlowAccumulation_sa(Output_flow_direction_raster, Output_accumulation_raster, "". "FLOAT") print "Flow accumulation raster created successfully" gp.addmessage ("Flow accumulation raster created successfully") # One is added to each pixel to get an count of how many pixel including the current are contributing the flow gp.Plus_sa (Output_accumulation_raster, "1", Output_Plus_raster) print "addition raster created successfully" gp.addmessage ("addition raster created successfully") # Contributing Area using the number of pixels and gp.times_sa (Output_Plus_raster, "25", Output_Times_raster) print "multiplication raster created successfully" gp.addmessage ("multiplication raster created successfully") # Process: Block Statistics... gp.BlockStatistics_sa (Output_surface_raster, Output_Mean_elev_raster, "Rectangle 3 3 CELL", "MINIMUM", "DATA") print "MIN elevation raster created successfully" gp.addmessage ("MIN elevation raster created successfully")

```
gp.Minus_sa (Output_surface_raster, Output_Mean_elev_raster, Output_edrop)
print "EDROP raster created successfully"
gp.addmessage ("EDROP raster created successfully")
Input_false_raster_or_constant_value = "0,005"
                    (Output edrop,
                                             Output edrop,
                                                                     Out change,
gp.Con sa
Input_false_raster_or_constant_value, "\"VALUE\" >= 0.005")
print "Change elevation raster created successfully"
gp.addmessage ("Change elevation raster created successfully")
Input true raster or constant value = "5"
false_raster_or_constant_value = "7,07"
gp.Con_sa(Output_flow_direction_raster, Input_true_raster_or_constant_value,
Out_distance, false_raster_or_constant_value, "\"VALUE\" = 1 OR \"VALUE\" = 4 OR
\"VALUE\" = 16 OR \"VALUE\" = 64")
print "Distance raster created successfully"
gp.addmessage ("Distance raster created successfully")
gp.Divide sa (Out change, Out distance, Out slope)
print "Slope raster created successfully"
gp.addmessage ("Slope raster created successfully")
gp.Divide_sa (Output_Times_raster, Out_slope, Out_preatan)
print "Pre-atan raster created successfully"
gp.addmessage ("Pre-atan raster created successfully")
gp.Ln_sa (Out_preatan, OutTWI)
print "TWI raster created successfully"
gp.addmessage ("TWI raster created successfully")
```
APÊNDICE B – Base de Regras para Cada SIF

SIF 1: Índice de Umidade (IU) + Capacidade de Campo (CC) = Índice de Umidade Ampliado (IUA) - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

```
1. If (IU is MB) and (CC is MB) then (IUA is MB) (1)
2. If (IU is B) and (CC is MB) then (IUA is MB) (1)
3. If (IU is M) and (CC is MB) then (IUA is MB) (1)
4. If (IU is A) and (CC is MB) then (IUA is B) (1)
5. If (IU is MA) and (CC is MB) then (IUA is M) (1)
6. If (IU is MB) and (CC is B) then (IUA is MB) (1)
7. If (IU is B) and (CC is B) then (IUA is B) (1)
8. If (IU is M) and (CC is B) then (IUA is B) (1)
9. If (IU is A) and (CC is B) then (IUA is M) (1)
10. If (IU is MA) and (CC is B) then (IUA is M) (1)
11. If (IU is MB) and (CC is M) then (IUA is B) (1)
12. If (IU is B) and (CC is M) then (IUA is M) (1)
13. If (IU is M) and (CC is M) then (IUA is M) (1)
14. If (IU is A) and (CC is M) then (IUA is A) (1)
15. If (IU is MA) and (CC is M) then (IUA is A) (1)
16. If (IU is MB) and (CC is A) then (IUA is M) (1)
17. If (IU is B) and (CC is A) then (IUA is M) (1)
18. If (IU is M) and (CC is A) then (IUA is A) (1)
19. If (IU is A) and (CC is A) then (IUA is A) (1)
20. If (IU is MA) and (CC is A) then (IUA is MA) (1)
21. If (IU is MB) and (CC is MA) then (IUA is M) (1)
22. If (IU is B) and (CC is MA) then (IUA is M) (1)
23. If (IU is M) and (CC is MA) then (IUA is A) (1)
24. If (IU is A) and (CC is MA) then (IUA is MA) (1)
25. If (IU is MA) and (CC is MA) then (IUA is MA) (1)
```

SIF 2: Índice de Umidade Ampliado (IUA) + Aspecto da Vertente (ASP) = Potencial de Umidade do Solo (PU) - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

```
1. If (IUA is MB) and (ASP is MB) then (PU is MB) (1)
2. If (IUA is B) and (ASP is MB) then (PU is MB) (1)
3. If (IUA is M) and (ASP is MB) then (PU is B) (1)
4. If (IUA is A) and (ASP is MB) then (PU is M) (1)
5. If (IUA is MA) and (ASP is MB) then (PU is A) (1)
6. If (IUA is MB) and (ASP is B) then (PU is B) (1)
7. If (IUA is B) and (ASP is B) then (PU is B) (1)
8. If (IUA is M) and (ASP is B) then (PU is M) (1)
9. If (IUA is A) and (ASP is B) then (PU is M) (1)
10. If (IUA is MA) and (ASP is B) then (PU is A) (1)
11. If (IUA is MB) and (ASP is M) then (PU is M) (1)
12. If (IUA is B) and (ASP is M) then (PU is M) (1)
13. If (IUA is M) and (ASP is M) then (PU is M) (1)
14. If (IUA is A) and (ASP is M) then (PU is A) (1)
15. If (IUA is MA) and (ASP is M) then (PU is A) (1)
16. If (IUA is MB) and (ASP is A) then (PU is M) (1)
17. If (IUA is B) and (ASP is A) then (PU is M) (1)
18. If (IUA is M) and (ASP is A) then (PU is A) (1)
19. If (IUA is A) and (ASP is A) then (PU is A) (1)
20. If (IUA is MA) and (ASP is A) then (PU is MA) (1)
21. If (IUA is MB) and (ASP is MA) then (PU is M) (1)
22. If (IUA is B) and (ASP is MA) then (PU is M) (1)
23. If (IUA is M) and (ASP is MA) then (PU is A) (1)
24. If (IUA is A) and (ASP is MA) then (PU is MA) (1)
25. If (IUA is MA) and (ASP is MA) then (PU is MA) (1)
```

SIF 3: Condutividade Hidráulica (CH) + Precipitação Média (PREC) = Condutividade Hidráulica Ampliada (CHA) - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

1. If (CH is MB) and (PREC is MB) then (CHA is MB) (1) 2. If (CH is B) and (PREC is MB) then (CHA is MB) (1) 3. If (CH is M) and (PREC is MB) then (CHA is MB) (1) 4. If (CH is A) and (PREC is MB) then (CHA is B) (1) 5. If (CH is MA) and (PREC is MB) then (CHA is B) (1) 6. If (CH is MB) and (PREC is B) then (CHA is B) (1) 7. If (CH is B) and (PREC is B) then (CHA is B) (1) 8. If (CH is M) and (PREC is B) then (CHA is B) (1) 9. If (CH is A) and (PREC is B) then (CHA is M) (1) 10. If (CH is MA) and (PREC is B) then (CHA is M) (1) 11. If (CH is MB) and (PREC is M) then (CHA is M) (1) 12. If (CH is B) and (PREC is M) then (CHA is M) (1) 13. If (CH is M) and (PREC is M) then (CHA is M) (1) 14. If (CH is A) and (PREC is M) then (CHA is M) (1) 15. If (CH is MA) and (PREC is M) then (CHA is M) (1) 16. If (CH is MB) and (PREC is A) then (CHA is M) (1) 17. If (CH is B) and (PREC is A) then (CHA is A) (1) 18. If (CH is M) and (PREC is A) then (CHA is A) (1) 19. If (CH is A) and (PREC is A) then (CHA is A) (1) 20. If (CH is MA) and (PREC is A) then (CHA is A) (1) 21. If (CH is MB) and (PREC is MA) then (CHA is A) (1) 22. If (CH is B) and (PREC is MA) then (CHA is A) (1) 23. If (CH is M) and (PREC is MA) then (CHA is MA) (1) 24. If (CH is A) and (PREC is MA) then (CHA is MA) (1) 25. If (CH is MA) and (PREC is MA) then (CHA is MA) (1) **SIF 4:** Condutividade Hidráulica Ampliada (CHA) + Cobertura da Vegetação (VEG) = CHAV - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

```
1. If (CHA is MB) and (VEG is MB) then (CHAV is MB) (1)
2. If (CHA is B) and (VEG is MB) then (CHAV is MB) (1)
3. If (CHA is M) and (VEG is MB) then (CHAV is B) (1)
4. If (CHA is A) and (VEG is MB) then (CHAV is M) (1)
5. If (CHA is MA) and (VEG is MB) then (CHAV is M) (1)
6. If (CHA is MB) and (VEG is B) then (CHAV is B) (1)
7. If (CHA is B) and (VEG is B) then (CHAV is B) (1)
8. If (CHA is M) and (VEG is B) then (CHAV is M) (1)
9. If (CHA is A) and (VEG is B) then (CHAV is M) (1)
10. If (CHA is MA) and (VEG is B) then (CHAV is A) (1)
11. If (CHA is MB) and (VEG is M) then (CHAV is M) (1)
12. If (CHA is B) and (VEG is M) then (CHAV is M) (1)
13. If (CHA is M) and (VEG is M) then (CHAV is A) (1)
14. If (CHA is A) and (VEG is M) then (CHAV is A) (1)
15. If (CHA is MA) and (VEG is M) then (CHAV is A) (1)
16. If (CHA is MB) and (VEG is A) then (CHAV is M) (1)
17. If (CHA is B) and (VEG is A) then (CHAV is M) (1)
18. If (CHA is M) and (VEG is A) then (CHAV is A) (1)
19. If (CHA is A) and (VEG is A) then (CHAV is A) (1)
20. If (CHA is MA) and (VEG is A) then (CHAV is MA) (1)
21. If (CHA is MB) and (VEG is MA) then (CHAV is A) (1)
22. If (CHA is B) and (VEG is MA) then (CHAV is A) (1)
23. If (CHA is M) and (VEG is MA) then (CHAV is MA) (1)
24. If (CHA is A) and (VEG is MA) then (CHAV is MA) (1)
25. If (CHA is MA) and (VEG is MA) then (CHAV is MA) (1)
```

SIF 5: CHAV + Potencial de Umidade do Solo (PU) = Potencial de Escoamento Superficial (PES) - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

1. If (CHAV is MB) and (PU is MB) then (PES is MB) (1) 2. If (CHAV is B) and (PU is MB) then (PES is MB) (1) 3. If (CHAV is M) and (PU is MB) then (PES is B) (1) 4. If (CHAV is A) and (PU is MB) then (PES is M) (1) 5. If (CHAV is MA) and (PU is MB) then (PES is M) (1) 6. If (CHAV is MB) and (PU is B) then (PES is MB) (1) 7. If (CHAV is B) and (PU is B) then (PES is B) (1) 8. If (CHAV is M) and (PU is B) then (PES is M) (1) 9. If (CHAV is A) and (PU is B) then (PES is M) (1) 10. If (CHAV is MA) and (PU is B) then (PES is A) (1) 11. If (CHAV is MB) and (PU is M) then (PES is B) (1) 12. If (CHAV is B) and (PU is M) then (PES is M) (1) 13. If (CHAV is M) and (PU is M) then (PES is M) (1) 14. If (CHAV is A) and (PU is M) then (PES is A) (1) 15. If (CHAV is MA) and (PU is M) then (PES is A) (1) 16. If (CHAV is MB) and (PU is A) then (PES is B) (1) 17. If (CHAV is B) and (PU is A) then (PES is M) (1) 18. If (CHAV is M) and (PU is A) then (PES is A) (1) 19. If (CHAV is A) and (PU is A) then (PES is A) (1) 20. If (CHAV is MA) and (PU is A) then (PES is MA) (1) 21. If (CHAV is MB) and (PU is MA) then (PES is M) (1) 22. If (CHAV is B) and (PU is MA) then (PES is M) (1) 23. If (CHAV is M) and (PU is MA) then (PES is A) (1) 24. If (CHAV is A) and (PU is MA) then (PES is MA) (1) 25. If (CHAV is MA) and (PU is MA) then (PES is MA) (1) **SIF 6:** Declividade (DEC) + Pedoforma da Encosta (PED) = Declividade Ampliada (DECA) - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

```
1. If (DEC is MB) and (PED is MB) then (DECA is MB) (1)
2. If (DEC is MB) and (PED is B) then (DECA is MB) (1)
3. If (DEC is MB) and (PED is M) then (DECA is B) (1)
4. If (DEC is MB) and (PED is A) then (DECA is M) (1)
5. If (DEC is MB) and (PED is MA) then (DECA is M) (1)
6. If (DEC is B) and (PED is MB) then (DECA is B) (1)
7. If (DEC is B) and (PED is B) then (DECA is B) (1)
8. If (DEC is B) and (PED is M) then (DECA is B) (1)
9. If (DEC is B) and (PED is A) then (DECA is M) (1)
10. If (DEC is B) and (PED is MA) then (DECA is A) (1)
11. If (DEC is M) and (PED is MB) then (DECA is M) (1)
12. If (DEC is M) and (PED is B) then (DECA is M) (1)
13. If (DEC is M) and (PED is M) then (DECA is A) (1)
14. If (DEC is M) and (PED is A) then (DECA is A) (1)
15. If (DEC is M) and (PED is MA) then (DECA is MA) (1)
16. If (DEC is A) and (PED is MB) then (DECA is M) (1)
17. If (DEC is A) and (PED is B) then (DECA is A) (1)
18. If (DEC is A) and (PED is M) then (DECA is A) (1)
19. If (DEC is A) and (PED is A) then (DECA is MA) (1)
20. If (DEC is A) and (PED is MA) then (DECA is MA) (1)
21. If (DEC is MA) and (PED is MB) then (DECA is A) (1)
22. If (DEC is MA) and (PED is B) then (DECA is A) (1)
23. If (DEC is MA) and (PED is M) then (DECA is A) (1)
24. If (DEC is MA) and (PED is A) then (DECA is MA) (1)
25. If (DEC is MA) and (PED is MA) then (DECA is MA) (1)
```

SIF 7: Declividade Ampliada (DECA) + Potencial de Escoamento Superficial (PES) = Potencial de Capacidade de Transporte (PCT) - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

```
1. If (DECA is MB) and (PES is MB) then (PCT is MB) (1)
2. If (DECA is B) and (PES is MB) then (PCT is MB) (1)
3. If (DECA is M) and (PES is MB) then (PCT is B) (1)
4. If (DECA is A) and (PES is MB) then (PCT is M) (1)
5. If (DECA is MA) and (PES is MB) then (PCT is M) (1)
6. If (DECA is MB) and (PES is B) then (PCT is MB) (1)
7. If (DECA is B) and (PES is B) then (PCT is B) (1)
8. If (DECA is M) and (PES is B) then (PCT is M) (1)
9. If (DECA is A) and (PES is B) then (PCT is M) (1)
10. If (DECA is MA) and (PES is B) then (PCT is A) (1)
11. If (DECA is MB) and (PES is M) then (PCT is B) (1)
12. If (DECA is B) and (PES is M) then (PCT is B) (1)
13. If (DECA is M) and (PES is M) then (PCT is M) (1)
14. If (DECA is A) and (PES is M) then (PCT is A) (1)
15. If (DECA is MA) and (PES is M) then (PCT is MA) (1)
16. If (DECA is MB) and (PES is A) then (PCT is M) (1)
17. If (DECA is B) and (PES is A) then (PCT is M) (1)
18. If (DECA is M) and (PES is A) then (PCT is A) (1)
19. If (DECA is A) and (PES is A) then (PCT is A) (1)
20. If (DECA is MA) and (PES is A) then (PCT is MA) (1)
21. If (DECA is MB) and (PES is MA) then (PCT is M) (1)
22. If (DECA is B) and (PES is MA) then (PCT is M) (1)
23. If (DECA is M) and (PES is MA) then (PCT is A) (1)
24. If (DECA is A) and (PES is MA) then (PCT is MA) (1)
25. If (DECA is MA) and (PES is MA) then (PCT is MA) (1)
```

SIF 8: Densidade Aparente (DA) + Porosidade (PORO) = Textura do Solo (TEXSOL)

- (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

```
1. If (DA is MB) and (PORO is MB) then (TEXSOL is MB) (1)
2. If (DA is MB) and (PORO is B) then (TEXSOL is MB) (1)
3. If (DA is MB) and (PORO is M) then (TEXSOL is B) (1)
4. If (DA is MB) and (PORO is A) then (TEXSOL is M) (1)
5. If (DA is MB) and (PORO is MA) then (TEXSOL is M) (1)
6. If (DA is B) and (PORO is MB) then (TEXSOL is MB) (1)
7. If (DA is B) and (PORO is B) then (TEXSOL is B) (1)
8. If (DA is B) and (PORO is M) then (TEXSOL is B) (1)
9. If (DA is B) and (PORO is A) then (TEXSOL is M) (1)
10. If (DA is B) and (PORO is MA) then (TEXSOL is M) (1)
11. If (DA is M) and (PORO is MB) then (TEXSOL is B) (1)
12. If (DA is M) and (PORO is B) then (TEXSOL is B) (1)
13. If (DA is M) and (PORO is M) then (TEXSOL is M) (1)
14. If (DA is M) and (PORO is A) then (TEXSOL is M) (1)
15. If (DA is M) and (PORO is MA) then (TEXSOL is A) (1)
16. If (DA is A) and (PORO is MB) then (TEXSOL is B) (1)
17. If (DA is A) and (PORO is B) then (TEXSOL is B) (1)
18. If (DA is A) and (PORO is M) then (TEXSOL is M) (1)
19. If (DA is A) and (PORO is A) then (TEXSOL is A) (1)
20. If (DA is A) and (PORO is MA) then (TEXSOL is A) (1)
21. If (DA is MA) and (PORO is MB) then (TEXSOL is B) (1)
22. If (DA is MA) and (PORO is B) then (TEXSOL is M) (1)
23. If (DA is MA) and (PORO is M) then (TEXSOL is M) (1)
24. If (DA is MA) and (PORO is A) then (TEXSOL is A) (1)
25. If (DA is MA) and (PORO is MA) then (TEXSOL is MA) (1)
```

SIF 9: Textura do Solo (TEXSOL) + Potencial de Capacidade de Transporte (PCT) = Potencial a Erosão (PE) - (MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; MA = muito alto).

```
1. If (TEXSOL is MB) and (PCT is MB) then (PE is MB) (1)
2. If (TEXSOL is B) and (PCT is MB) then (PE is B) (1)
3. If (TEXSOL is M) and (PCT is MB) then (PE is B) (1)
4. If (TEXSOL is A) and (PCT is MB) then (PE is M) (1)
5. If (TEXSOL is MA) and (PCT is MB) then (PE is M) (1)
6. If (TEXSOL is MB) and (PCT is B) then (PE is MB) (1)
7. If (TEXSOL is B) and (PCT is B) then (PE is B) (1)
8. If (TEXSOL is M) and (PCT is B) then (PE is B) (1)
9. If (TEXSOL is A) and (PCT is B) then (PE is M) (1)
10. If (TEXSOL is MA) and (PCT is B) then (PE is A) (1)
11. If (TEXSOL is MB) and (PCT is M) then (PE is B) (1)
12. If (TEXSOL is B) and (PCT is M) then (PE is M) (1)
13. If (TEXSOL is M) and (PCT is M) then (PE is M) (1)
14. If (TEXSOL is A) and (PCT is M) then (PE is A) (1)
15. If (TEXSOL is MA) and (PCT is M) then (PE is A) (1)
16. If (TEXSOL is MB) and (PCT is A) then (PE is M) (1)
17. If (TEXSOL is B) and (PCT is A) then (PE is M) (1)
18. If (TEXSOL is M) and (PCT is A) then (PE is A) (1)
19. If (TEXSOL is A) and (PCT is A) then (PE is A) (1)
20. If (TEXSOL is MA) and (PCT is A) then (PE is MA) (1)
21. If (TEXSOL is MB) and (PCT is MA) then (PE is M) (1)
22. If (TEXSOL is B) and (PCT is MA) then (PE is A) (1)
23. If (TEXSOL is M) and (PCT is MA) then (PE is A) (1)
24. If (TEXSOL is A) and (PCT is MA) then (PE is MA) (1)
25. If (TEXSOL is MA) and (PCT is MA) then (PE is MA) (1)
```