

JOSÉ CLÁUDIO FARIA

**MODELAGEM DA PROPENSÃO À DENSIFICAÇÃO DO SOLO
EM RESPOSTA AOS CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2000

JOSÉ CLÁUDIO FARIA

**MODELAGEM DA PROPENSÃO À DENSIFICAÇÃO DO SOLO
EM RESPOSTA AOS CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 20 de outubro de 2000.

Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Conselheiro)

Prof. Hugo Alberto Ruiz
(Conselheiro)

Prof. José Maria Nogueira Costa

Prof. Jugurta Lisboa Filho

Prof. Liovando Marciano da Costa
(Orientador)

Aos meus pais *Luiz e Venina*.

À minha esposa *Grace* e às minhas filhas *Carolina e Marina*.

Aos meus irmãos *Luís Carlos e Priscilla*.

A todas as pessoas dedicadas ao conhecimento dos solos
brasileiros.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Departamento de Solos, pela disponibilização dos recursos.

Ao professor Liovando Marciano da Costa, pela clareza dos objetivos no decorrer da orientação e pelos constantes estímulos, insubstituíveis para a superação dos desafios com os quais me defrontei.

Ao professor Elpídio Inácio Fernandes Filho, pela generosidade da convivência e pelas inúmeras sugestões apresentadas ao longo dos trabalhos.

Aos professores Carlos Ernesto G.R. Schaefer e Hugo Alberto Huiz, presenças importantes desde o início de meus estudos de pós-graduação, pelos ensinamentos e estímulos.

Ao Dr. Brauliro Gonçalves Leal, pelo auxílio na compreensão da natureza do problema abordado e pela disponibilização das funções de cálculo da evapotranspiração de referência.

À Ludimila Monjardim Casagrande, pela participação eficiente nas etapas iniciais da análise e no desenvolvimento do programa computacional, e ao Rogério Vieira Silva, pelos esforços empreendidos na otimização e padronização da interface.

À família de Antônio Gomide, cujas portas do lar estiveram e se mantiveram sempre abertas para mim e minha família durante meus estudos de pós-graduação.

À minha esposa Grace e às minhas filhas Carolina e Marina, pela compreensão do afastamento físico no decorrer de mais este curso.

Aos amigos acadêmicos, pelo apoio, pela convivência e pelos estímulos.

Aos funcionários que tanto me auxiliaram.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JOSÉ CLÁUDIO FARIA, filho de Luiz Zine de Faria e Venina Fosse Faria, nasceu em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, em 17 de março de 1958.

Em 1982, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Viçosa.

De 1982 a 1993, trabalhou como profissional autônomo no Estado do Espírito Santo.

Em março de 1993, iniciou o curso de mestrado em Manejo e Conservação do Solo no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa.

Atuou como monitor nível II no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa nas disciplinas SOL 325 - Classificação do Solo, no segundo semestre de 1994, e SOL 320 - Gênese, Física e Classificação do Solo, no primeiro semestre de 1995.

Em agosto de 1995, concluiu o curso de mestrado no Departamento de Fitotecnia, na Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 1995, como bolsista do CNPq, iniciou o curso de doutorado no Departamento de Fitotecnia, na área de Manejo e Conservação do Solo, na Universidade Federal de Viçosa.

Em julho de 1999, foi aprovado em concurso público na Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), no Estado da Bahia, onde vem, desde então, desenvolvendo atividades ligadas ao ensino e à pesquisa.

CONTEÚDO

	PÁGINA
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Os fundamentos	5
2.1.1. Água no solo	5
2.1.2. Argila-água-eletrólitos	6
2.1.3. Forças de atração e repulsão	10
2.2. Mecanismos de estresse dos agregados	15
2.2.1. Mecanismos clássicos a partir dos fundamentos	15
2.2.2. Mecanismos de estresse dos agregados encontrados nos trabalhos experimentais	19
2.2.2.1. Quebra por compressão do ar encapsulado	20
2.2.2.2. Quebra por expansão diferencial	21
2.2.2.3. Quebra mecânica pelo impacto da gota	21
2.2.2.4. Dispersão físico-química	21
2.3. Resultados experimentais	22
2.4. Os ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS): mecanismo de gênese e, ou, agentes de destruição da estrutura do solo?	26
2.5. Conclusões e recomendações: cenários de pesquisa	32

3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. Descrição do programa	37
3.1.1. A modelagem numérica	39
3.1.2. Clima	40
3.1.3. Solo	40
3.1.3.1. Profundidade efetiva do solo: camada única vs. múltiplas camadas	40
3.1.3.2. Precipitação efetiva vs. velocidade de infiltração básica (VIB)	41
3.1.3.3. Condutividade hidráulica do solo	42
3.1.3.4. Solo úmido vs. solo seco	42
3.1.4. Vegetação	43
3.1.4.1. Coeficiente de evapotranspiração da vegetação, K_v .	43
3.2. Concepção e desenvolvimento metodológico básico para a evolução do programa visando o mapeamento quanto a propensão à densificação	43
3.2.1. Edição inicial dos mapas temáticos	45
3.2.2. Processamento dos mapas temáticos	48
3.2.3. Exportação do mapa temático para o MapPDS	49
3.2.4. Modelagem do balanço hídrico	50
3.2.5. Sistema especialista	51
3.2.6. Proposta de definição do grau de propensão à densificação .	51
3.2.7. Formulação e teste de hipóteses	53
3.2.8. Importação do mapa de propensão a densificação	53
3.2.9. Editoração final do mapa de propensão a densificação ...	54
3.3. Propensão quanto à densificação e uso do solo: refinamento do método	54
3.4. Aplicação da modelagem do balanço hídrico: um estudo de caso	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. O programa	56
4.2. Estudo de caso	56
4.2.1. Estudo comparativo entre dois locais	59
4.2.2. Simulação da densificação progressiva do solo de Capinópolis	62
4.2.3. Influência dos limites adotados para solo seco e úmido sobre algumas variáveis fornecidas pelo programa	62
5. RESUMO E CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICES	79

RESUMO

FARIA, José Cláudio, D.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2000. **Modelagem da propensão à densificação do solo em resposta aos ciclos de umedecimento e secagem.** Orientador: Liovando Marciano da Costa. Conselheiros: Hugo Alberto Ruiz, Carlos Ernesto G.R. Schaefer e Elpídio Inácio Fernandes Filho.

É cada vez maior a necessidade de conhecer em detalhes a distribuição, as características e as limitações de uso dos solos. No contexto das limitações, a propensão à densificação necessita ser mais bem compreendida, diagnosticada e mapeada, para que a sociedade possa ser informada com precisão sobre sua distribuição espacial. Esta necessidade justifica-se pela importância do fenômeno no contexto ambiental e pelo fato de a fronteira agrícola nacional se encontrar em constante transformação e expansão. Assim, uma vez obtida, esta informação poderá auxiliar na tomada de decisão, objetivando amenizar e, ou, retardar seus impactos sobre os agroecossistemas, sobretudo seus reflexos sobre as economias regionais e o meio ambiente. Em seus aspectos mais amplos, este trabalho apresenta e discute uma proposta metodológica para o mapeamento dos solos quanto a esta propensão. Em um contexto mais específico, discute a utilização das características dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS), enquanto variável

potencialmente promissora, para a estratificação dos solos em relação ao fenômeno. Todo o desenvolvimento conceitual e metodológico tem sido materializado em um programa computacional (Mapeamento da Propensão à Densificação do Solo - MapPDS) apresentado e discutido. Na fase em que se encontra, o programa possibilita o estudo qualitativo e quantitativo das características dos CSUS, a partir da disponibilidade de séries extensas de dados meteorológicos, representativos de um local, via modelagem computacional, utilizando as informações pertinentes do perfil do solo e da cobertura vegetal. A expectativa é de que as informações sobre os CSUS, obtidas via modelagem computacional, estejam incluídas na composição de um conjunto lógico de variáveis, definidoras do grau de propensão à densificação de cada unidade de mapeamento, dessa nova classificação técnica do solo ora proposta.

ABSTRACT

FARIA, José Cláudio, D.S., Universidade Federal de Viçosa, October of 2000. **Soil prone modelling to densification in response to wetting and drying cycles.** Adviser: Liovando Marciano da Costa. Committee Members: Hugo Alberto Ruiz, Carlos Ernesto G.R. Schaefer and Elpídio Inácio Fernandes Filho.

There is an increasing need of knowing in detail the distribution, characteristics and the constraints of soil use. Concerning the limitations, the density susceptibility needs a better understanding, diagnosing and mapping, so that a broader public can be informed with precision about its spatial distribution. Thus, once we have obtained this information, it can help the decision-making process, with the aim of mitigating or delaying its impacts on agrosystems, especially their consequences on the regional economies and the environment. Broadly speaking, this work presents and discusses a methodological proposal for the mapping of the soil density susceptibility. More specifically, it discusses the utilization of the characteristics of cycles of wetting and drying (CSUS), as promising potential variable for the stratification of soils in relation to the phenomenon. All the conceptual and methodological development has been materialized in a computational program (MapPDS) introduced and discussed. At this stage the program makes possible the qualitative and

quantitative study of the CSUS characteristics, through the availability of a long-term climatic data, representative of a place, via modelling, using all the relevant information of the soil profile and vegetation cover. It is expected that the information about CSUS, obtained via computational modelling, can be included in the composition of a logical set of variables, defining the degree of density susceptibility of each mapping unit, on the technical classification of the soil, now proposed.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vários trabalhos de pesquisa têm sido dedicados ao estudo das inter-relações entre as características dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS) e os fenômenos de adensamento e, ou, compactação do solo.

No Brasil, a terminologia que tem sido proposta para estes fenômenos é a que se segue. Para todo aumento de densidade, em um ou mais horizontes, relacionado à aplicação de força sobre a superfície, deve ser utilizado o termo compactação. Para os demais processos que provocam aumento da densidade sugere-se o termo adensamento (COSTA e ABRAHÃO, 1996). Neste trabalho é utilizado um terceiro termo, densificação, como referência genérica e sintética ao resultado final do processo de redução da porosidade, o que implica aumento da densidade do solo, em uma ou mais camadas, independentemente da origem.

Embora a densificação seja reconhecida como o resultado da entropia sobre a estrutura (ADDISCOTT, 1995), muitas dúvidas persistem sobre sua formação e dinâmica. Em função do fenômeno, quando a intensidade é acentuada o bastante, têm sido observados: redução na eficiência dos fertilizantes aplicados; redução do montante d'água infiltrada durante as chuvas; e redução na eficiência do uso d'água armazenada em função das restrições do crescimento radicular e elevação nos custos de

preparo, refletidos na redução da produtividade e rentabilidade das atividades agrossilvipastoris.

Nos centros urbanos, os impactos ambientais decorrentes do fenômeno também se fazem sentir. Têm sido observados redução contínua da disponibilidade de água dos mananciais hídricos ao longo do tempo, aumento nos custos de captação e tratamento d'água, assoreamento de rios, lagos e represas, entre outros.

Existe consenso entre pesquisadores, técnicos e produtores de que sua reversibilidade, numa escala de tempo que interessa às atividades antrópicas, é, na maioria dos casos, se não impossível, difícil e onerosa. Neste sentido, uma vez instalado, o fenômeno vai sempre impor limites às opções de uso do solo, além de exigir a adoção de práticas de manejo e conservação de custo questionável e ainda não muito definidas.

Diante de um problema dessa natureza, em um país de crescente expansão da fronteira agrícola como o Brasil, é de capital importância que se possa prever a propensão do solo ao fenômeno. Se esta propensão for diagnosticada, mapeada e disponibilizada, poderá ser incorporada como informação, auxiliando no processo de tomada de decisão, objetivando amenizar e, ou, retardar seus impactos sobre os agroecossistemas, sobretudo seus reflexos sobre as economias regionais e o meio ambiente.

Na Universidade Federal de Viçosa, várias teses de mestrado (JUSKSCH, 1987; CARVALHO, 1991; GJORUP, 1992; OLIVEIRA, 1992; OLIVEIRA, 1994; ABRAHÃO, 1995; CARVALHO JÚNIOR, 1995; FERNANDES, 1996; GOMES, 1996; JANTSCH, 1997) e doutorado (MALTONI, 1994; JUCKSCH, 1995) enfatizaram direta ou indiretamente o fenômeno. Estes estudos, em conjunto com outros revisados na literatura nacional e internacional, deram suporte à hipótese de que as características dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS) aos quais o solo esteve submetido em condições naturais, aliadas às suas propriedades inerentes (físicas, sedimentológicas, mineralógicas, químicas e possivelmente da biota), poderiam ser utilizadas, em um modelo preditivo, como estratificadoras no diagnóstico de sua propensão à densificação.

Os objetivos do presente trabalho foram: a) concepção e desenvolvimento de um programa computacional para possibilitar o estudo qualitativo e quantitativo do regime hídrico pretérito dos solos, com ênfase nas características dos CSUS, via modelagem, a partir de séries extensas de dados meteorológicos, utilizando as variáveis pertinentes do solo e da cobertura vegetal; b) avaliação preliminar do potencial de estratificação de ambientes, em relação ao fenômeno em estudo, das variáveis fornecidas pelo programa; e c) concepção de um método para possibilitar o mapeamento dos solos quanto à propensão à densificação, considerando as variáveis obtidas pelo programa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O objetivo final do modelo preditivo em desenvolvimento é mapeamento dos solos quanto à propensão à densificação. Nesse sentido, as características dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS) compõem, a princípio, um subconjunto importante do conjunto principal das variáveis a serem contempladas e testadas. A ênfase dos trabalhos, até então, consistiu no desenvolvimento das formas de obtenção e gerenciamento das informações sobre essas características.

Neste tópico é discutida a fundamentação teórica que motivou o desenvolvimento do método ora apresentado e discutido.

Julgou-se necessário iniciar esta revisão de literatura dos mecanismos da gênese de agregados, em que são discutidos, de forma sintética, a água no solo, o sistema argila-água-eletrólitos e as forças de atração e repulsão. Em seguida, são discutidos os mecanismos de gênese e estresse desses agregados, relacionados aos CSUS, assim como os principais resultados experimentais encontrados.

2.1. Os fundamentos

2.1.1. Água no solo

No capítulo dedicado à água do solo, MITCHELL (1976) escreveu dois parágrafos que devem permanecer latentes durante todo o contexto desta revisão:

“A estrutura e as propriedades da água no solo não são conhecidas em detalhes. Na realidade, não existe uma teoria rigorosa disponível para a estrutura da água pura e líquida, apenas hipóteses, algumas das quais explicam as propriedades melhor que outras” (p. 100).

“A natureza da interação solo-água e a interpretação de suas conseqüências não são claras” (p.104).

Feitas essas considerações, uma vez que ambos não são quimicamente inertes, água e partículas do solo interagem entre si. Esta interação influencia o comportamento físico e físico-químico do sistema (MITCHELL, 1976), embora detalhes destas interações, e suas conseqüências, não possam ser tidos como certezas.

Com base no trabalho de MITCHELL (1976), os possíveis mecanismos de interação solo-água são:

- a) Ponte de hidrogênio: Como a superfície de um mineral do solo é usualmente composta de oxigênio e hidrogênio, ou hidroxilas, pontes de hidrogênio podem ocorrer, com o oxigênio atraindo o pólo positivo e o hidrogênio o pólo negativo da molécula de água. As pontes de hidrogênio são parcialmente covalentes (FRANK, 1958). A formação destas pontes com a superfície das partículas pode alterar a distribuição do elétron da água normal (LOW, 1961), facilitando a formação de pontes adicionais com moléculas na mesma camada ou na vizinhança.
- b) Hidratação de cátions trocáveis: Se os cátions forem atraídos para a superfície negativa da argila, sua água de hidratação também o será.

Este mecanismo ganha importância à medida que o conteúdo de água no solo diminui.

- c) Atração por osmose: A concentração iônica aumenta nas proximidades da superfície negativa das argilas. Em razão deste aumento e das restrições na difusão dos íons, como resultado da atração eletrostática pelos colóides, as moléculas da água tendem a se difundir para a superfície coloidal, na tentativa de equilibrar a concentração.
- d) Atração dipolar por superfícies carregadas: Partículas de argila podem ser vistas como condensadores de placas negativas, com a força do campo elétrico decrescendo com a distância a partir da superfície, devido à presença de cargas positivas. A água pode se orientar, com seus pólos positivos direcionados para a superfície negativa, com o grau de orientação decrescendo com a distância, a partir da superfície. Entre as placas paralelas, no meio plano, entretanto, poderia haver desordem estrutural, porque os pólos poderiam ser adjacentes uns aos outros.
- e) Atração por forças de London – van de Waals: Estas forças podem atrair moléculas de água para a superfície das argilas. As flutuações do elétron, formando dipolos temporários, agem em todas as unidades da matéria.

2.1.2. Argila-água-eletrólitos

As interações entre partículas do solo, cátions adsorvidos e água surgem porque existem forças de campo desbalanceadas entre os constituintes. Os efeitos das forças de interação superficial manifestam-se por intermédio de uma variedade de forças atrativas e repulsivas, que, por seu lado, influenciam ou controlam o comportamento de floculação-dispersão das argilas em suspensão (MITCHELL, 1976).

A química coloidal provê os mecanismos para a descrição das interações no sistema argila-água-eletrólitos. A Teoria de GOUY (1910) e CHAPMAN (1913), também conhecida por dupla camada difusa (DCD), tem

recebido grande atenção por parte dos pesquisadores e tem sido aplicada para entender o comportamento de argilas com grau variado de sucesso (MITCHELL, 1976).

Já quase secular, a descrição matemática de Gouy-Chapman foi concebida para superfícies planas e esféricas. A espessura da dupla camada é sensível às variações no potencial de cargas superficiais, concentração eletrolítica, valência dos cátions, constante dielétrica e temperatura:

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{D.K.T}{\rho_0 \cdot e^2 \cdot v^2} \right)^{1/2} \quad \text{eq.1}$$

em que

- 1/K = espessura da DCD;
- ρ_0 = concentração do cátion;
- D = constante dielétrica do meio;
- K = constante de Boltzmann, $K = 1,38E-16 \text{ erg}^{\circ}\text{K}$;
- T = temperatura, $^{\circ}\text{K}$;
- E = carga eletrônica, $e = 4,80E-10 \text{ esu}$; e
- V = valência do cátion.

Dessa forma, têm-se os seguintes efeitos:

- a) Concentração de eletrólitos: O aumento na concentração eletrolítica não só reduz o potencial de superfície, mas também a queda de potencial com a distância da superfície torna-se muito mais rápida. À medida que a concentração de eletrólitos aumenta, a DCD se contrai. Portanto, o comportamento do sistema, quanto à umidade, depende em parte da concentração eletrolítica.
- b) Valência dos cátions: Alterações na valência dos cátions alteram o potencial da superfície e a espessura da DCD. Aumentos na valência dos cátions promoverão decréscimo na repulsão interpartículas.
- c) Constante dielétrica: Influencia o potencial superficial e a espessura da DCD. Quanto maior a constante dielétrica, ou seja, quanto maior a facilidade de polarização e orientação das moléculas da substância em

um campo elétrico, maior a espessura da DCD. A relação é $1/K = D^{1/2}$. Se, em vez de água ($D = 80$), a fase líquida for álcool ($D = 24,3$), a espessura da DCD será reduzida por um fator de $(24,3/80)^{1/2} = 0,55$.

- d) Temperatura: O aumento da temperatura provoca acréscimo na espessura da DCD e decréscimo no potencial superficial. Entretanto, um aumento na temperatura resulta, também, em decréscimo na constante dielétrica (Quadro 1).

Pode-se observar que pequenas variações no produto (DT), devido ao aumento da temperatura, significam, teoricamente, que a espessura da dupla camada não é grandemente influenciada.

A teoria assume os seguintes pressupostos:

- a) Os íons na DCD são considerados pontos de carga (não têm volume e podem se aproximar da superfície sem limites) e não há interação entre eles (não existe especificidade de íons, ou seja, todos os monovalentes se comportam da mesma maneira, da mesma forma os bivalentes, etc.).
- b) As cargas na superfície das partículas são uniformemente distribuídas.
- c) A superfície das partículas é plana e maior que a espessura da DCD (para o modelo plano).
- d) A constante dielétrica do meio é independente da posição.

Quadro 1 - Temperatura, constante dielétrica e seu produto

T°C	T°K	Constante dielétrica	DT
0	273	88,0	2,40E4
20	293	80,0	2,34E4
25	298	78,5	2,34E4
60	333	66,0	2,20E4

Fonte: MITCHELL (1976).

Nos fenômenos reais, entretanto, algumas variáveis fogem da condição-padrão. Assim, podem-se ter os seguintes fatores influenciando o sistema (MITCHELL, 1976):

- a) Energias secundárias: Efeito das forças do campo elétrico da constante dielétrica, ou seja, interação de Coloumb entre os íons ($F=Q_1.Q_2/D.d^2$) e forças de repulsão entre a superfície e os íons.
- b) Água adsorvida: O efeito do campo elétrico na estrutura da água pode ser importante em certas condições.
- c) Tamanho dos íons: A teoria da DCD foi corrigida por STERN (1924), passando-se a considerar o volume dos íons na DCD. A correção implicou que não seria permitido a eles aproximarem-se da superfície sem limites. Passa-se a conceber uma camada de íons mais próximo à superfície (camada de Stern), desprovidos de água de hidratação, a uma distância denominada “distância de maior aproximação”, e depois uma camada difusa de íons hidratados. A teoria foi posteriormente resumida por van OLPHEN (1963).

As correções de STERN (1924) no modelo DCD tiveram as seguintes implicações:

- a) Limitação da aproximação dos íons.
- b) Os íons passam a ter uma interação específica.
- c) Limitação da capacidade da camada de Stern: Serão adsorvidos os íons que fisicamente se ajustarem a esta camada. Assim, a carga total na superfície é igual ao total das cargas que são neutralizadas pelos íons na camada de Stern (não-hidratados), mais os íons na camada difusa (hidratados).
- d) pH: As partículas de argila podem possuir hidroxilas (OH) expostas em suas superfícies e bordas. A tendência de dissociação da hidroxila é fortemente influenciada pelo pH. Em adição, o alumínio, que é exposto nas bordas das partículas de argila, possui natureza anfotérica, ionizando positivamente em baixos valores de pH e negativamente em altos valores. Como consequência, duplas camadas positivas podem se desenvolver nas bordas de algumas partículas, em ambientes ácidos.

Tais duplas camadas são de potencial de carga constante, em oposição às cargas superficiais com H^+ , servindo como íon determinante. Em razão destas considerações, o pH desempenha importante papel na suspensão de argilas. Baixos valores de pH promovem interação entre a borda positiva e a superfície negativa, freqüentemente permitindo a floculação das suspensões. Suspensões estáveis, ou dispersão de argilas, requerem elevados valores de pH. Embora uma compreensão apropriada do comportamento de muitos sistemas argila-água-eletrólitos não possa ser obtida sem considerar a influência do pH, o relacionamento quantitativo ainda carece de dados para muitos minerais (MITCHELL, 1976).

- e) Ânions adsorvidos: A teoria, como desenvolvida, assume a atração de cátions pela superfície da partícula carregada negativamente e a repulsão de todos os ânions. Existem situações, entretanto, em que os ânions específicos são atraídos e passam a fazer parte da partícula, aumentando a eletronegatividade.

O modelo de Gouy, Chapmam e Stern tem recebido maior atenção no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. No entanto, na literatura, o modelo DLVO vem ganhando espaço nas revisões e atualizações dos pesquisadores (IWATA et al., 1988). Este modelo foi proposto independentemente por Derjaguim e Landau (1941) e por Verwey e Overbeek (1948), citados por IWATA et al. (1988). O método de Derjaguim e Landau utiliza considerações de força para obter a força repulsiva entre partículas, enquanto Verwey e Overbeek utilizam energia. Os resultados, entretanto, são, em essência, fisicamente idênticos (IWATA et al., 1988).

2.1.3. Forças de atração e repulsão

A energia atrativa, entre um par de moléculas (LONDON, 1937), foi estendida por CASIMIR e POLDER (1948), para se obter a atração entre planos paralelos. Assumindo que a interação seja aditiva, a seguinte equação foi concebida:

$$V_a = - \left[\frac{A}{48\pi \cdot d^2} + \frac{1}{(d + \delta)^2} + \frac{2}{\left(d + \frac{\delta}{2}\right)^2} \right] \quad \text{eq.2}$$

em que

V_a = energia atrativa entre planos paralelos;

d = metade da distância entre planos medida a partir do plano de superfície;

δ = espessura dos planos; e

A = constante de van der Waals, variando entre E-10 e E-14 ergs. van OLPHEN (1963) sugere A na ordem de E-12, enquanto DEJARGUIM (1960) considera $5E-14$ um valor mais adequado.

O conhecimento do potencial e da distribuição de cargas da interação de duplas camadas pode ser utilizado para computar a energia e a força eletrostática de repulsão por unidade de área em um plano. A energia de repulsão (V_r) é dada por

$$V_r = 2 (F_d - F_\infty) \quad \text{eq.3}$$

em que F_d é a energia livre da DCD por unidade de área em um plano espaçado de $2d$ e F_∞ é a energia livre de uma camada simples, desconsideradas as interações. As tabelas de F_d e F_∞ são disponíveis em Verwey e Overbeek (1948), citados por MITCHELL (1976).

Lifshitz (1955), citado por MITCHELL (1976), e DEJARGUIM (1960) demonstraram que as forças de van der Waals são eletromagnéticas e que o momento elétrico instantâneo é dependente da frequência. A teoria de Lifshitz aplica-se à separação de todas as partículas. Os resultados gerais desta teoria (Inglês, 1962, citado por MITCHELL, 1976) são de que as forças atrativas são dependentes da distância:

$$F_2 \propto \frac{Bk}{d^4} \quad \text{eq.4}$$

em que B e K são constantes, sendo A da ordem de E-13 erg e B uma constante deduzível da ordem de E-19 erg cm. Black et al. (1960), citados por MITCHELL (1976), determinaram a força por cm^2 entre dois planos de quartzo:

$$F_2 = \frac{C}{d_u^4} \text{ dina/cm}^2 \quad \text{eq.5}$$

em que d_u é a distância de separação em μm e C é da ordem de $1,0 E-3$ a $2,0 E-3$ (valores experimentais) ou $0,6 E-3$ a $1,6 E-3$ (teoria de Lifshitz).

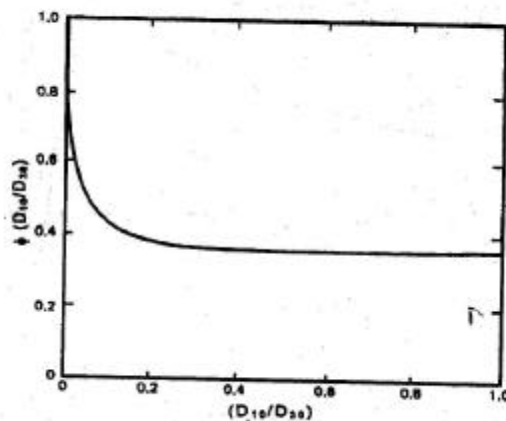
Para o caso geral de dois corpos separados por um meio, a constante dielétrica deve ser conhecida para toda a extensão de freqüências. Embora a equação seja complicada, algumas simplificações são possíveis (Diyaloshinskii et al., 1961, citados por MITCHELL, 1976) em certos casos. Para duas partículas de argila com a constante dielétrica estática D_{10} , separadas de uma distância d por um fluido com a constante dielétrica estática D_{30} , o seguinte relacionamento é obtido:

$$F_2 = \frac{\pi}{480} \times \frac{hc}{d^4} \times \frac{1}{\sqrt{D_{30}}} \times \frac{D_{10} - D_{30}}{D_{10} + D_{30}} \Phi \frac{D_{10}}{D_{30}} \quad \text{eq.6}$$

em que h é a constante de Plank e c é a velocidade da luz (Figura 1).

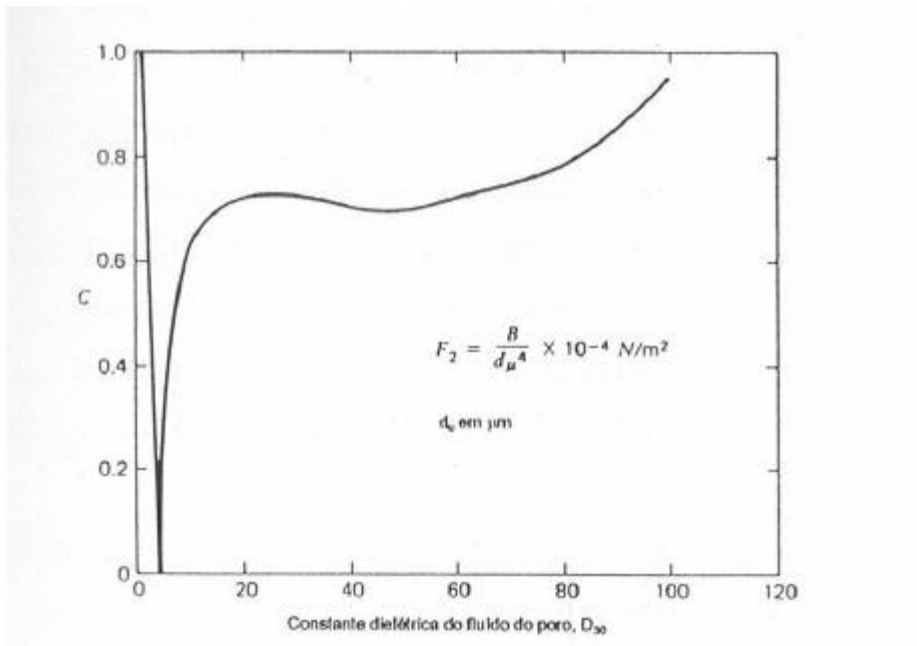
A avaliação do coeficiente $1/d^4$ da eq.5 (que é o mesmo da eq.6), como uma função da constante dielétrica do meio (D_{30}), separando as duas partículas, para d em μm , fornece o resultado mostrado na Figura 2.

A repulsão interpartículas, devido à interação das DCD, aumenta monotonicamente ($1/K \propto D^{1/2}$) com o aumento da constante dielétrica (MOORE e MITCHELL, 1974). A força de interação líquida varia conforme mostrado na Figura 3.



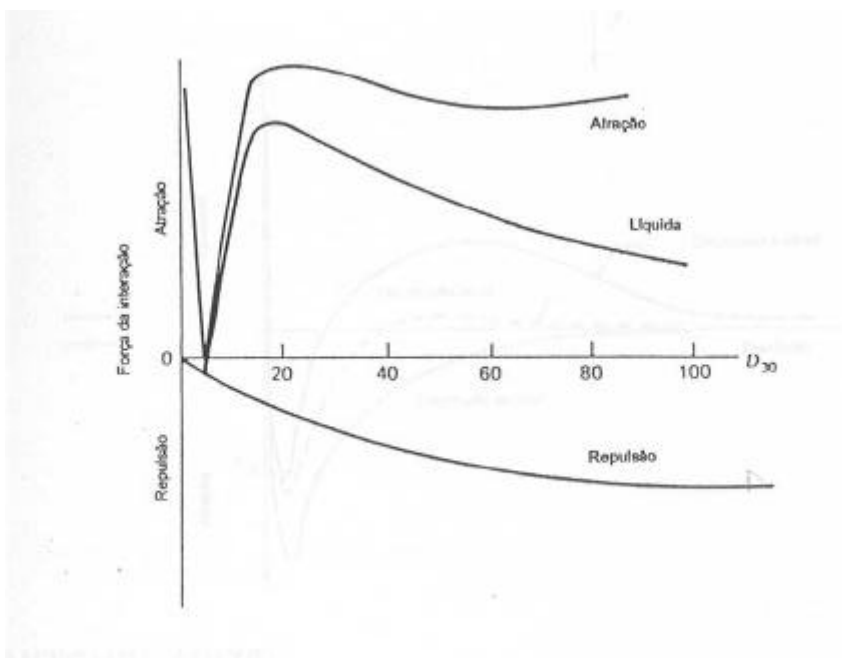
Fonte: MITCHELL (1976).

Figura 1 - Função da constante dielétrica para forças atrativas, calculadas pela teoria de Lifshitz.



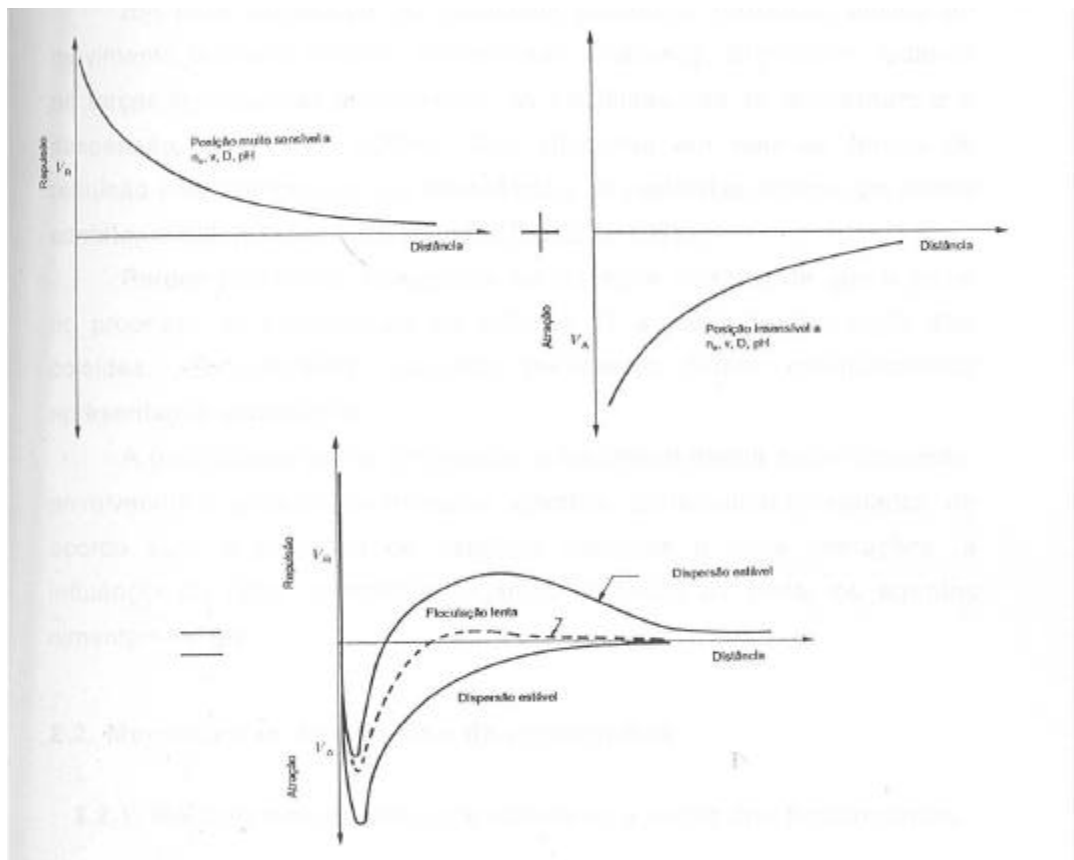
Fonte: MITCHEL (1976).

Figura 2 - Efeito da constante dielétrica do fluido nos poros nas forças atrativas de van der Waals.



Fonte: MITCHEL (1976).

Figura 3 - Efeito combinado das forças de interação.



Fonte: MITCHEL (1976).

Figura 4 - Energia de repulsão, atração e curva líquida de interação para planos paralelos (n_e = concentração eletrolítica; v = valência; D = constante dielétrica).

Em síntese, a energia de repulsão entre partículas é sensível a alterações na concentração eletrolítica, valência dos cátions, constante dielétrica e no pH. A energia de atração, por sua vez, é sensível apenas às alterações na constante dielétrica e temperatura (MITCHELL, 1976). Nos casos em que a curva líquida de interação exibe barreira repulsiva de energia, as partículas em suspensão não entram em contato íntimo, e a suspensão permanece estável. Quando a barreira de energias repulsivas não existe, as partículas entram em estreita proximidade e flocculam, o que é representado pelo pico de mínimo na curva de energia (MITCHELL, 1976).

Em uma suspensão, as partículas tornam-se próximas, devido ao movimento termal e errático, denominado movimento Browniano. Quando as forças de repulsão predominam, as partículas não se aproximam e a suspensão permanece estável. Nas situações em que as forças de repulsão não existem, ou são minoritárias, as partículas entram em íntimo contato, resultando em flocculação (MITCHELL, 1976).

Parece não haver divergência na literatura clássica de que o início do processo de estruturação do solo se dá a partir da flocculação dos colóides. Os principais conceitos pertinentes foram resumidamente apresentados e discutidos.

A partir desse ponto, entretanto, o fenômeno ganha outra dimensão, envolvendo a síntese de minerais amorfos, extremamente variados de acordo com a presença de espécies químicas e suas interações, a influência do meio, a matéria orgânica, o efeito da biota, os agentes cimentantes, etc.

2.2. Mecanismos de estresse dos agregados

2.2.1. Mecanismos de estresse clássicos a partir dos fundamentos

Quando o conteúdo d'água do solo aumenta, ou a concentração da solução eletrolítica diminui, o volume do solo aumenta. Este fenômeno é denominado expansão ("swelling"). Em consequência, uma pressão adicional é necessária para prevenir que o volume do solo aumente. Esta

pressão é denominada “pressão de expansão”, sendo fundamentalmente dependente da partícula com cargas superficiais (IWATA et al., 1988).

A expansão ocorre quando o potencial químico da água na solução torna-se maior que o daquela água localizada nos espaços entre as partículas. Para um determinado mineral, a magnitude da pressão de expansão depende apenas da diferença do potencial químico da água. No campo da engenharia geotécnica, não há nenhuma dúvida de que a introdução de água no sistema é o mais importante fator que contribui para a variação de volume nos solos (CARDOSO, 1994).

Os mecanismos de expansão são divididos em estágios, segundo NORRISH (1972):

- a) Primeiro estágio: A distância entre as duas camadas 2:1 varia de 0,4 a 20 angstroms e aumenta à medida que a argila recebe água. Ao final deste estágio, a distância depende da CTC da argila e das espécies de cátion entre as camadas. Para cátions monovalentes, como Na e Li, a expansão pode ocorrer espontaneamente para o segundo estágio. A expansão permanece no primeiro estágio para íons bivalentes e trivalentes, mesmo se as partículas foram imersas em água. Estas alterações dependem da magnitude das forças de repulsão e atração. As características destas forças, que determinam a expansão no primeiro estágio, não estão ainda claras quantitativamente.
- b) Segundo estágio: Para cátions monovalentes entre as camadas, como Na e Li, à medida que a concentração da solução decresce, a distância entre as camadas aumenta prontamente para centenas de angstroms. As forças repulsivas, devido às camadas de íons, são dominantes neste estágio, mas são suplementadas, em distâncias inferiores a 100 angstroms, por causa da interação entre a água e a superfície da partícula de argila. Em adição, quando a concentração for próxima de 0,2 a 0,3 N, as forças atrativas de van der Waals devem ser levadas em consideração. As camadas de montmorilonita são mantidas juntas através das ligações borda-face. Conseqüentemente, as forças de fricção entre camadas, e ligações borda-face, são forças atrativas. Onde as camadas são arranjadas paralelas umas com as outras, estas forças tornam-se negligenciáveis.

c) Terceiro estágio: A separação das camadas neste estágio é limitada apenas pelo volume de água disponível. As camadas podem se associar devido ao movimento termal, formando ligações borda-borda ou borda-face. Embora estas ligações sejam fracas, influenciam propriedades como viscosidade e tixotropia. Com cátions bivalentes ou trivalentes entre as camadas, a expansão não pode proceder para o segundo e terceiro estágios, para cada par de camada simples. Muitas unidades são combinadas por forças eletrostáticas e agem como uma unidade. Esta unidade de partículas produz expansão devido às cargas elétricas das superfícies externas.

Os valores do índice de expansão, para minerais de argila, variam de 0,2 para caulinita até 17 para a montmorilonita (BOLT, 1956), para soluções preparadas com Na, embora valores menores que 2 sejam usuais.

Para MITCHELL (1976), em amostras indeformadas, o índice de expansão é inferior a 0,1 para materiais não-expansivos e maior que 0,2 no caso de solos expansivos (Quadro 2).

As propriedades do solo que interessam à engenharia geotécnica dependem das interações e dos efeitos inter-relacionados de vários fatores. Estes fatores podem ser divididos em dois grupos: de composição e ambientais. Os fatores de composição determinam a extensão para qualquer propriedade. Eles podem ser estudados usando amostras deformadas. São incluídos neste grupo: tipo de mineral, quantidade do mineral, tipo de cátion adsorvido, forma e distribuição das partículas e, por último, composição da água nos poros.

Os fatores ambientais determinam o valor atual para qualquer propriedade. Amostras de material de solo indeformadas, ou análises “*in situ*”, são requeridas para estes estudos, os quais incluem: conteúdo de água, densidade, pressão de confinamento, temperatura, “fabric” [o termo “fabric” refere-se a arranjo das partículas, grupos de partículas e espaço poroso no solo. O termo estrutura envolve os mecanismos combinados de “fabric”, composição e forças interpartículas. “Macrofabric” envolve estratificação, fissuramento, espaços vazios, heterogeneidade, entre outros (MITCHELL, 1976)], e disponibilidade de água.

Quadro 2 - Índice de expansão de alguns minerais do solo

Mineral	Fluido nos poros	Cátion	Concentração mmol/L	Índice de expansão
Caulinita	H ₂ O	Na	1	0,08
	H ₂ O	Na	1E-4	0,08
	H ₂ O	Ca	1	0,07
	H ₂ O	Ca	1E-4	0,07
	Álcool etílico			0,06
	Tetracloroeto de carbono			0,05
	Ar seco			0,04
Ilita	H ₂ O	Na	1	0,37
	H ₂ O	Na	1E-3	0,65
	H ₂ O	Ca	1	0,28
	H ₂ O	Ca	1E-3	0,31
	Álcool etílico			0,19
	Tetracloroeto de carbono			0,04
	Ar seco			0,04
Esmectita	H ₂ O	Na	1	1,53
	H ₂ O	Na	1E-4	3,60
	H ₂ O	Na	1	0,26
	H ₂ O	Na	1E-3	0,34
	Álcool etílico			0,10
	Tetracloroeto de carbono			0,03
Muscovita	H ₂ O			0,42
	Álcool etílico			0,35
	Tetracloroeto de carbono			0,41
Areia				0,01 a 0,03

Fonte: OLSON e MESRI (1970).

2.2.2. Mecanismos de estresse encontrados nos trabalhos experimentais

Os mecanismos de estresse (quebra) dos agregados do solo são definidos, em um excelente trabalho de revisão, por LE BISSONNAIS (1996). Quatro mecanismos são definidos: “slaking”, isto é, a quebra dos agregados provocada pela compressão do ar encapsulado durante o umedecimento (PANABOKKE e QUIRK, 1957); quebra por umedecimento diferencial (KHEYRABY e MONNIER, 1968; LE BESSONNAIS, 1989); quebra pelo impacto da gota de chuva (NEARING e BRADFORD, 1985); e (iv) dispersão físico-química devido ao estresse osmótico (EMERSON, 1967; SHAINBERG et al., 1992). As principais características destes mecanismos são mostradas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características dos mecanismos de quebra dos agregados

	Quebra por compressão do ar encapsulado	Quebra por umedecimento diferencial	Quebra pelo impacto da chuva	Dispersão físico-química
Tipo de forças envolvidas	Pressão interna do ar encapsulado durante o umedecimento	Pressão interna pela expansão diferencial	Pressão externa pelo impacto da chuva	Forças atrativas internas entre partículas coloidais
Propriedades do solo controlando o mecanismo	Porosidade, molhabilidade, coesão interna	Potencial de expansão, condições de umedecimento, coesão	Coesão (argila, matéria orgânica, óxidos)	Status iônico, mineralogia da argila
Fragmentos resultantes	Microagregados	Macro e microagregados	Partículas elementares	Partículas elementares
Intensidade da degradação	Grande	Limitada	Cumulativa	Total

A partir de LE BISSONNAIS (1996).

2.2.2.1. Quebra por compressão do ar encapsulado

É a quebra dos agregados causada pela compressão do ar encapsulado em seu interior durante o umedecimento (YODER, 1936; PANABOKKE e QUIRK, 1957; EMERSON, 1967). Na literatura internacional, recebe a denominação de “slaking”. Ocorre quando os agregados secos são imersos em água ou rapidamente umedecidos. O efeito depende do volume de ar no interior dos agregados, da taxa de umedecimento (LOCH, 1994) e da força de rompimento (“shear strength”) dos agregados úmidos (NEARING e BRADFORD, 1985). Ocorre mesmo sem nenhuma agitação mecânica do solo em água, embora esta agitação aumente seu efeito, em razão da adicional quebra mecânica ou dispersão. Segundo PANABOKKE e QUIRK (1957) e TRUMAN et al. (1990), a quebra decresce à medida que a umidade inicial dos agregados aumenta. Este efeito se deve à redução do volume do ar encapsulado durante o umedecimento e também à redução no gradiente de potencial mátrico.

A quebra ocorre porque a estabilidade do agregado não é forte o bastante para conter o estresse produzido pela expansão diferencial (EMERSON, 1977), pelo aprisionamento do ar e pela rápida liberação de calor devido à expansão (COLLIS-GEORGE e GREENE, 1979).

Os fragmentos resultantes são principalmente microagregados, e estes aumentam de tamanho proporcionalmente ao conteúdo de argila. Isto pode ser explicado de acordo com o modelo de porosidade textural (Fiels e Stengel, 1981, citados por LE BISSONNAIS, 1996): o volume e a resistência das ligações entre a argila e o esqueleto das partículas primárias aumentam com o conteúdo de argila.

A desestabilização, que ocorre através do “slaking” durante o molhamento, tem-se mostrado parcialmente dependente da taxa de expansão (PANABOKKE e QUIRK, 1957; QUIRK e PANABOKKE, 1962; SULLIVAN, 1990). Uma relação linear inversa entre “slaking” e conteúdo de C orgânico e uma relação linear positiva entre “slaking” e taxa de expansão foram encontradas por CHAN e MULLINS (1994).

2.2.2.2. Quebra por expansão diferencial

A expansão diferencial (“shrinkage”) durante o umedecimento e a secagem resulta em microfissuramento (“microcracking”) dos agregados (KHEYRABI e MONNIER, 1968). O fenômeno depende das mesmas propriedades da quebra dos agregados causada pela compressão do ar encapsulado em seu interior, incluindo a taxa de umedecimento, e produz microagregados do mesmo tamanho e tipo, em solos inicialmente úmidos (LE BOSSONNAIS, 1989). Entretanto, a distinção entre os mecanismos deve-se à atuação de processos físicos diferentes, embora alguns autores utilizem a palavra “slaking” para ambos os mecanismos. A quebra dos agregados causada pela compressão do ar encapsulado em seu interior durante o umedecimento é inversamente proporcional ao conteúdo de argila, enquanto a quebra por expansão diferencial é diretamente proporcional.

2.2.2.3. Quebra mecânica pelo impacto da gota

A quebra dos agregados pelo impacto direto das gotas, usualmente, ocorre em combinação com outros mecanismos (AL-DURRAH e BRADFORD, 1982; Boiffin, 1984, Nearing et al., 1987, Bradford e Huang, 1992, citados por LE BISSONNAIS, 1996). A quebra mecânica pelo impacto das gotas assume um aspecto dominante devido ao enfraquecimento das forças de atração entre as partículas quando o solo encontra-se úmido. Os fragmentos resultantes são geralmente pequenos (< 100 μm) e ocorrem juntamente com as partículas primárias.

2.2.2.4. Dispersão físico-química

A dispersão físico-química resulta da redução das forças de atração entre partículas coloidais durante o umedecimento (EMERSON, 1967; Sumner, 1992, citado por LE BISSONNAIS, 1996). Em relação aos mecanismos clássicos, já apresentados, nenhuma informação nova, que

mereça destaque, foi apresentada por LE BISSONNAIS (1996). Entre seus comentários, ressalta-se, apenas, que as partículas elementares são o resultado final da dispersão, em vez dos microagregados.

BRESSON e BOIFFIN (1990) consideram a dispersão o mais efetivo processo de quebra dos agregados, influenciando acentuadamente os efeitos dos outros mecanismos.

A dispersão envolve a quebra dos agregados em partículas primárias e ocorre, freqüentemente, em solos com elevada saturação de Na no complexo sortivo (EMERSON, 1977). A dispersibilidade dos colóides depende da estabilidade dos agregados em água e é influenciada por tipo e quantidade de cátions trocáveis (EL-SWAIFY et al., 1970), especialmente Na (SHAINBERG e CAISERMAN, 1971; MacINTYRE, 1979), quantidade de ligantes orgânicos (TISDALE e OADES, 1982; KRETZSCHMAR et al., 1993) óxidos de Al e Fe (GOLDBERG et al., 1988), conteúdo de argila (BRUBAKER et al., 1992), composição mineralógica (YARON e THOMAS, 1968; ARORA e COLEMAN, 1979), força iônica e pH (GILLMAN, 1974; SUAREZ et al., 1984) e PCZ (GILLMAN, 1974).

2.3. Resultados experimentais

RASIAH e KAY (1995), trabalhando em campo, estabeleceram relações matemáticas interessantes entre as variáveis envolvidas na desestabilização estrutural dos agregados:

$$\theta_t \propto e^{-kt}$$

$$k \propto - \text{Argila} - \text{MO} - \text{pH} - \text{Manejo} + (\text{Argila} \times \text{MO})$$

em que

θ_t = umidade do solo em função do tempo de umedecimento;

k = constante;

t = tempo; e

MO = matéria orgânica.

A constante k fornece uma indicação da intensidade da desestabilização que ocorre durante o umedecimento dos agregados. Quanto maior o valor de k , maior a umidade final do agregado em um dado

tempo, em geral da ordem de 1 a 10 minutos, ou seja, o agregado absorve água rapidamente. Como o fenômeno é multivariado, k é uma variável sintética, determinada através dos procedimentos de correlação e regressão. Solos com baixo teor de argila e matéria orgânica, sob sistema intensivo de preparo, foram caracterizados por elevados valores de k (RASIAH e KAY, 1995).

No trabalho de RASIAH e KAY (1995), a alteração da umidade provocou maior impacto na estabilidade dos agregados dos solos cultivados que aqueles provenientes de unidades experimentais sob gramíneas. Adicionalmente, os efeitos foram maiores em solos siltosos que argilosos. Nas parcelas com forragem permanente (“bluegrass”), ou naquelas que receberam material orgânico devido à rotação de cultura, esses autores detectaram maior estabilidade dos agregados. Foi sugerido que a reduzida taxa de umedecimento deveu-se ao acréscimo na cimentação decorrente dos exsudados da biomassa. Alternativamente, estes exsudados podem gerar poros mais hidrofóbicos após o secamento, reduzindo a taxa de umedecimento. Estas observações são compatíveis com SULLIVAN (1990) e BISDOM et al. (1993). A argila e a matéria orgânica possuem efeito cimentante, mantendo os agregados unidos e reduzindo o número de zonas de falha (RASIAH e KAY, 1994a,b).

De acordo com RASIAH e KAY (1995), a expansão diferencial foi o principal fator de desestabilização estrutural em solos argilosos, ao passo que em solos de textura siltosa a compressão do ar encapsulado foi o principal fator. A desestabilização devido a alterações no conteúdo de água durante e após o umedecimento dependeu do tipo de solo, da história de cultivo, da taxa de umedecimento e do tamanho dos agregados. Agregados maiores mostraram-se muito mais susceptíveis ao “slaking” que os menores, devido à presença comum de maior número de zonas de falhas.

BRESSON e MORAN (1995), trabalhando com técnicas micromorfológicas, detalharam um pouco mais os processos de degradação estrutural provocados pelo umedecimento e pela secagem. Segundo os autores, apenas três dos processos de formação de crosta revisados por BRESSON e VALENTIN (1994) desempenham funções em “hardsetting” - condição em que o solo se apresenta compacto, duro,

aparentemente sem estrutura, formado no secamento (McDonald et al., 1984, citados por BRESSON e MORAN, 1995): “slaking”, principalmente devido à compressão do ar encapsulado no interior dos agregados (ROBINSON e PAGE, 1950), que induz a fragmentação física de agregados em fragmentos ou partículas elementares; microfissuramento, devido à expansão (Dexter, 1988, e Le Bissonais, 1990, citados por BRESSON e MORAN, 1995); e coalescência, que não envolve a destruição do agregado, mas provoca deformações sob condições plásticas (BRESSON e BOIFFIN, 1990).

“Hardsetting” difere de crosta superficial de várias formas, principalmente em relação ao fato de que a profundidade alterada pode estender-se a profundidades superiores a 200 mm (GUSLI et al., 1994), enquanto a crosta superficial, tipicamente, alcança profundidades próximas de 10 mm (GUSLI et al., 1994; FARIA et al., 1998).

Muitos estudos de “hardsetting” atribuem o desenvolvimento da dureza ao secamento, relacionado ao potencial mátrico (LEY et al., 1989) e aos efeitos da taxa de secamento (WEAICH et al., 1992; MULLINS et al., 1992). Menos atenção tem sido dedicada ao colapso estrutural no umedecimento (COLLIS-GEORGE e GREENE, 1979; MULLINS et al., 1992; GUSLI et al., 1994).

MULLINS et al. (1990) observam que o “hardsetting” no umedecimento resulta da quebra de agregados, processo já bem documentado na formação de crostas. Entretanto, o processo de encrostamento é dirigido por dois fenômenos: a energia livre de umedecimento e a energia cinética das gotas. Em “hardsetting”, a energia livre do umedecimento combina-se com a pressão sobrecarga que compacta os agregados.

De acordo com BRESSON e MORAN (1995), os processos que determinam as alterações estruturais ocorrem no umedecimento. Na fração grosseira, ocorre coalescência dos agregados sob condições plásticas. Este efeito é pronunciado por causa do microfissuramento dos agregados maiores e “slaking” parcial da margem dos agregados, em razão do rápido umedecimento. Nas amostras com frações finas, verifica-se aglomeração dos agregados, decorrente da tensão matricial.

Pelo que foi visto até aqui, parece estar havendo concordância de que a ação dos mecanismos desestabilizadores da estrutura dá-se durante o processo de umedecimento do solo. Quando o solo seca, esses fenômenos, então, se manifestam (LEY et al., 1989; MULLINS et al., 1992; BRESSON e MORAN, 1995).

A literatura faz freqüente referência aos efeitos relativos do umedecimento “rápido” ou “lento” na estrutura dos agregados. Entretanto, o fator determinante, na ausência da energia cinética das gotas, é a energia potencial da solução de umedecimento. Geralmente, o umedecimento com energia potencial zero (durante irrigação por superfície ou chuvas intensas) provoca efeito destruidor maior que o umedecimento com água com potencial negativo (Kemper e Koch, 1966, citados por GUSLI et al., 1994).

A destruição das unidades estruturais causada pelo rápido umedecimento tem sido atribuída à expansão desigual, devido à absorção desigual de água pelos agregados (GRANT e DEXTER, 1990), ao desenvolvimento de pressão na matriz do solo causada pelo ar aprisionado (PANABOKKE e QUIRK, 1957; EMERSON, 1964) e à expansão do ar “desorbed” da superfície pelo fluido de umedecimento (KEMPER et al., 1985).

Os resultados experimentais obtidos por SETA e KARATHANANIS (1996), utilizando amostras de solo com composição físico-química e mineralogia diversificada, sugerem que as propriedades que afetaram mais fortemente a dispersibilidade coloidal foram Fe e Al amorfos e cristalinos, extraídos utilizando oxalato de amônio e citrato-bicarbonato-ditionito, respectivamente, no solo e o conteúdo de caulinita na fração argila. A variável simples que melhor estimou a dispersibilidade do solo foi a concentração de Al total, expressa na forma logarítmica. Ligeiros aumentos no coeficiente de determinação (R^2) foram obtidos quando se combinaram caulinita, Fe total e Al total no modelo de regressão múltipla, sugerindo sinergismo entre estas variáveis. Comparado com Fe, Al mostrou-se mais efetivo no controle da dispersibilidade coloidal.

GOLDBERG e GLAUBIG (1987) sugerem que as diferenças entre óxidos de alumínio e ferro em promover a estabilidade dos agregados provavelmente se devam aos contrastantes tamanho e morfologia, ou seja,

óxidos de alumínio possuem grande proporção de partículas de dimensões reduzidas e densidade de cargas superiores aos óxidos de Fe. Adicionalmente, óxidos de Al, usualmente, ocorrem na forma plana, podendo neutralizar as cargas das argilas mais eficientemente que os polímeros esféricos de Fe (OADES, 1984). Com respeito ao efeito redutor da dispersibilidade provocado pela caulinita, as justificativas dos autores baseiam-se na forte atração eletrostática borda-face, em baixo valor de pH, usual nos ambientes de ocorrência de caulinita, superando as forças repulsivas e causando mínima dispersão em relação às argilas de maior atividade, entre os materiais de solo estudados.

2.4. Os ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS): mecanismo de gênese e, ou, agentes de destruição da estrutura do solo?

Uma estrutura superficial grosseira dos vertissolos do sudeste do Zimbábue, desenvolvidos de basalto, com predominância de montmorilonita, em condições de campo, é associada com a rápida formação de selamento superficial. Estes solos são denominados “weakly” ou “non-self mulching”, contrariamente aos vertissolos com estrutura fina em grumos, denominados “self mulching”.

A propensão para “self mulch”, embora desejável, não é inteiramente compreendida. Depende não apenas das propriedades do solo em si, mas também dos processos impostos que afetam esta propensão, como os métodos de manejo e os CSUS. Alterações devidas ao umedecimento não são inteiramente reversíveis no secamento, e essa histerese permite o progressivo desenvolvimento de unidades estruturais (HUSSEIN e ADEY, 1995).

Este mesmo solo, anteriormente citado (“self mulching”), foi transformado em massivo por manipulação com espátula em vidro plano, em condições plásticas. Posteriormente, as amostras foram submetidas aos CSUS. Observou-se que a estrutura passou, gradativamente, de massiva para grumosa, em blocos ou plana. As unidades estruturais

formadas foram inicialmente grandes, decrescendo progressivamente para fina a ultrafina, enquanto os pedos passaram de fracos a fortemente desenvolvidos. A formação de espaços planares foi dominante nos primeiros ciclos alternados, mas os espaços compostos (“compound voids”) passaram a predominar à medida que a quantidade de ciclos aumentou. Observaram-se alterações no “b-fabric”, com redução na orientação das argilas durante os processos de secagem com os CSUS. Adicionalmente, a maior orientação foi observada em seções finas feitas a partir de cortes verticais nos blocos impregnados que nos horizontais, sugerindo que a orientação paralela se deveu à frente de umedecimento (HUSSEIN e ADEY, 1998).

BARZEGAR et al. (1995) estudaram o efeito dos CSUS como fator de desenvolvimento de microestrutura a partir dos elementos texturais simples (argila, silte e areia), ao mesmo tempo em que avaliaram o efeito sobre os “solos” após submetidos à compactação. Para isso, argilas de diferentes mineralogias foram isoladas e individualmente misturadas com silte e areia de um Alfisol. As misturas, com Ca predominando no complexo sortivo, foram submetidas a 10 CSUS, simulando as condições de campo, objetivando prover a microagregação. As amostras foram compactadas com o conteúdo de água fixo, e a força de deformação foi mensurada antes e após os CSUS. As amostras foram umedecidas em duas velocidades de umedecimento: rápida e lenta. Foi observado que diferentes estágios de microagregação ocorreram de acordo com a proporção de cada tipo de argila, tendo-se verificado que a agregação foi proporcional à expansividade das argilas. Esses autores, infelizmente, exploram muito pouco o efeito da mineralogia na formação dos diferentes tamanhos de microagregados (> 50, 50-20 e 20-2 μm). Entretanto, o gráfico apresentado permite inferir que ocorreram diferenças interessantes na proporção do tamanho dos agregados em relação às composições mineralógicas, sendo elas de interpretação difícil na ausência de uma análise estatística que abordasse esse enfoque. Solos compactados cuja mineralogia era dominada por minerais interestratificados (RIM), não especificados pelos autores, exibiram grande resistência à deformação antes dos CSUS. A resistência à deformação diminui à medida que aumenta esse número, em

diferentes extensões, para o umedecimento rápido e lento. Em geral, o grau de reversibilidade da compactação, em razão do desenvolvimento de microfissuras, aumentou com a expansividade das argilas e a velocidade de umedecimento.

SINGER et al. (1992) demonstraram que a estabilidade dos agregados obtidos misturando areia e argila é afetada pelos CSUS, pelo conteúdo de argila e pela mineralogia. Os autores demonstraram que a estabilidade dos agregados aumenta com o número de CSUS, devido ao desenvolvimento de um manto de argila sobre os grãos de areia e de pontes entre eles.

Estabeleceu-se, então, um paradoxo. Vários trabalhos referem-se aos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem como um fator que ativa mecanismos destruidores da estrutura do solo, enquanto em outros este mesmo fator passa a ativar os mesmos mecanismos, agora sob o ponto de vista de melhoradores da estrutura de solos apedais e, ou, com estrutura degradada.

Este paradoxo pode se estender às observações de UTOMO e DEXTER (1982). Segundo estes autores, em laboratório, as aplicações de CSUS resultaram em constante decréscimo da percentagem de agregados estáveis em água de diâmetros menores que 500 μm . Já em relação ao solo revolvido pelo preparo, a percentagem dos agregados estáveis primeiramente aumenta para um valor máximo e, em seguida, decresce constantemente, à medida que os ciclos de umedecimento e secagem se sucedem. Diante dos resultados contraditórios e por vezes paradoxais, os autores propuseram a teoria do equilíbrio de estados ou de proporções de agregados estáveis em água. De acordo com a composição e as alterações físicas, os solos que contêm proporções abaixo deste equilíbrio poderão aumentar, enquanto solos com valores acima tendem a reduzir.

Uma maneira de compreender esses processos, de forma a contornar o aparente paradoxo, pode estar na influência dos CSUS em relação ao tamanho das partículas e, ou, dos agregados e à sua dinâmica de formação/destruição (Figura 5).

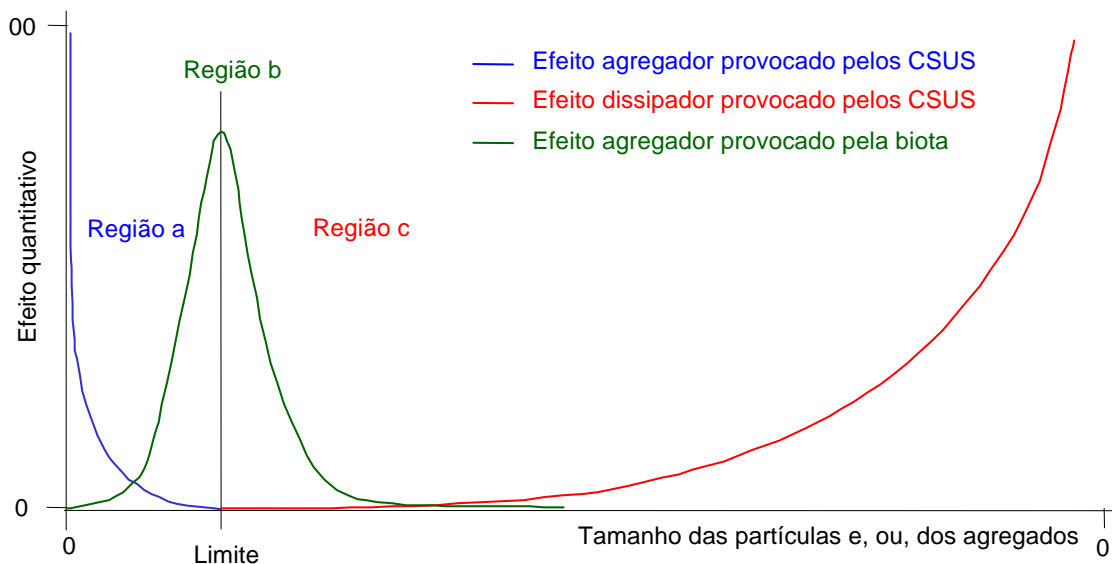


Figura 5 - Efeito relativo dos CSUS e da biota em relação ao tamanho das partículas e, ou, dos agregados.

Na “região a” (Figura 5), os efeitos agregadores provocados pelos CSUS sobre as partículas elementares e, ou, microagregados são pronunciados e os efeitos de fragmentação, negligenciáveis. Esta é uma região de predomínio de forças e processos descritos no sistema argila-água-eletrólitos.

Nesta região b, uma vez formados os agregados, para que ocorra fragmentação, são necessárias alterações físico-químicas no sistema de modo a favorecer as forças de repulsão interpartículas, ou a utilização de energia superior à que mantém as partículas elementares unidas. São exemplos: energia cinética das gotas, elevação do pH, aumento na atividade de cátions monovalentes de elevado raio iônico hidratado, etc. Quando a entropia (ADDISCOTT, 1995), provocada pelos CSUS, ocorre nesta região, a tendência geral é a fragmentação de microagregados em partículas elementares (areia, silte e argila). Segundo a proposta de LE BISSONNAIS (1996), os mecanismos de quebra de agregados nesta região seriam a quebra pelo impacto da chuva e a dispersão físico-química.

Os resultados experimentais encontrados por JUSCKSCH (1987) mostraram que a desestabilização dos agregados de diâmetro menor que 210 μm foi significativa com as alterações físico-químicas do sistema provocadas pela calagem, enquanto os agregados de diâmetros maiores praticamente não foram afetados.

Na “região c” (Figura 5) os efeitos desestruturadores dos CSUS são pronunciados e os efeitos agregadores, negligenciáveis. Nesta região, os efeitos dos mecanismos “slaking” e quebra por umedecimento diferencial são pronunciados. Quando a entropia aumenta nesta região, a tendência é a fragmentação de agregados em pedriscos cada vez menores, até que o tamanho dos agregados atinja o “limite” assinalado (Figura 5). Abaixo deste limite, como já discutido, os efeitos dos mecanismos ativados pelo fator CSUS passam a ter influências negligenciáveis.

Reforçando o modelo, os resultados encontrados por SHIEL et al. (1988) mostram claramente que, independentemente do tamanho original, após cinco ciclos de umedecimento e secagem, os agregados de um solo de textura fina (61% de argila e 33% de silte), com elevado coeficiente de expansão linear (20%), não-esmectítico e com pequena proporção de mineral expansivo interestratificado apresentaram diâmetros médios finais praticamente similares, ou seja, a intensidade de degradação estrutural foi mais intensa nos agregados maiores. A partir do quinto ciclo, a redução exponencial do tamanho médio dos agregados foi muito pequena.

Termodinamicamente, o solo é um sistema aberto, podendo trocar energia e matéria com a vizinhança. É caracterizado, quando em equilíbrio, pela mínima entropia. Os fenômenos envolvidos no desenvolvimento da estrutura (floculação, agregação, etc.) representam processos de ordenamento e, portanto, reduzem a entropia. Os fenômenos inversos ao desenvolvimento da estrutura representam os processos de desordem ou dissipação (dispersão, desagregação, “slaking”, etc.) (ADDISCOTT, 1995).

Se os fenômenos e processos forem compreendidos sob este ponto de vista, na “região b” (Figura 5), pode-se conceber, principalmente nas condições tropicais, um intenso e dinâmico movimento de construção/destruição da estrutura do solo. Esta seria uma região de predomínio de forças e processos relativos à biota. Como a estruturação

nesta região é uma forma de ordenamento termodinâmico do sistema (ADDISCOTT, 1995), pode-se conceber, novamente, que a biota (JUMA, 1993; OADES, 1993; DEGENS, 1997) possui uma função essencialmente contrária à entropia provocada pelas forças dissipativas. Em outras palavras, a função de ordenamento termodinâmico do solo, na “região b”, seria essencialmente, se não exclusivamente, uma atribuição da biota.

Sob este enfoque, o fenômeno gênese/destruição de agregados apresenta-se muito dinâmico. Os dois efeitos (CSUS e biota) considerados no modelo são, evidentemente, sintéticos, ou seja, são determinados, cada um, por um conjunto de variáveis analíticas, com freqüente ocorrência de interações. Entretanto, o modelo proposto pode ser útil para se compreender o fenômeno em seus aspectos mais amplos.

A região do entorno do limite representaria o tamanho dos agregados de máxima freqüência para cada situação, isto é, este limite é variável para cada conjunto de variáveis analíticas. Em uma situação de equilíbrio dinâmico, representa o tamanho predominante dos agregados encontrados para determinado solo, em relação ao conjunto das variáveis.

A ação da biota assume uma função de extrema importância na manutenção da fertilidade física do solo. Como em todo sistema biológico natural, as concepções de “strain (limite plástico)” e “estresse (limite elástico)” (LARCHER, 1986) devem ser consideradas. Aparentemente, e esta é uma observação pessoal, os solos tropicais em estágio avançado de evolução pedogenética possuem um limite elástico de “estresse” bastante amplo. Uma vez que se adotem práticas de manejo que favoreçam a atividade da biota, a fertilidade física pode-se restaurar de forma relativamente rápida. Por outro lado, práticas que não a favoreçam, aplicadas por um período de tempo relativamente longo, podem ultrapassar o limite elástico do sistema solo e atingir o limite plástico (“strain”). Neste caso, a reversibilidade, além de não se dar na escala de tempo que interessa às atividades antrópicas, pode ser muito onerosa.

Considerou-se, nesta discussão, apenas a função da biota na gênese dos macroagregados, embora o conjunto lógico de evidências apresentadas por SCHAEFER (1996), relativas também à sua possível importância na

gênese da microestrutura dos latossolos, não deva ser, a princípio, por desconhecimento ou pela estranheza provocada, desconsiderado.

Muitos pesquisadores percebem com clareza que os grandes ciclos da biosfera são dirigidos por processos de ordenamento e dissipação. O sistema solo-planta é um componente-chave de muitos destes ciclos, e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas depende da manutenção de um balanço apropriado entre ordenação e dissipação (ADDISCOTT, 1995).

2.5. Cenários de pesquisa

Ao término desta revisão de literatura, pode-se abstrair que:

- a) O termo “gênese”, freqüentemente utilizado como “gênese de camadas adensadas”, “gênese de camadas compactadas”, etc. como referência aos fenômenos inversos ao desenvolvimento da estrutura, parece não ser o mais adequado. Entende-se que esta utilização pode conduzir a uma concepção equivocada do real significado desses fenômenos. Na realidade, segundo ADDISCOTT (1995), esses fenômenos representam, ou são conseqüência, processos de desordem ou dissipação da estrutura do solo, e não de gênese ou criação de estrutura. Sob o conceito termodinâmico, “gênese de camada adensada e, ou, compactada” poderia ser interpretado como “origem (ou criação) de uma destruição (ou transformação) na estrutura do solo”, e isto seria um paradoxo.
- b) Parece haver um lapso na literatura cobrindo a transição entre os mecanismos clássicos, tanto de gênese quanto no colapso de agregados, e os atuais trabalhos, dedicados principalmente à micromorfologia.
- c) Os efeitos dos mecanismos ativados pelos CSUS podem atuar tanto na gênese como na destruição de agregados do solo, estando o efeito entrópico, ou seu contrário, condicionado pelo tamanho e pela natureza das partículas elementares e, ou, dos agregados. Nos grãos simples e microagregados, seu principal efeito é contrário à entropia, ou seja,

favorece a gênese. No entanto, nos “macroagregados”, seu efeito é predominantemente dissipador da estrutura, sendo favorecido pela presença de minerais expansivos, pela elevada velocidade de umedecimento e pela baixa umidade inicial.

- d) Existe carência de estudos que envolvam os minerais predominantes nos solos tropicais. É comum encontrar na literatura internacional trabalhos que avaliam os efeitos dos CSUS em materiais de solo onde as argilas do grupo da caulinita são a referência de mineralogia não expansiva, juntamente com a ilita. Em condições tropicais, entretanto, e possivelmente por razões ainda não muito claras (OLIVEIRA, 1992; JANTSCH, 1997), quando predominante em “macroagregados”, em relação aos grupos dos oxiidróxidos, o grupo da caulinita tem-se mostrado mais susceptível às forças dissipativas. Embora a caulinita seja considerada um mineral pouco expansível, a simples introdução de água no solo, devido à expansão, pode provocar ruptura nos pontos de maior fragilidade dos agregados onde este mineral é predominante. Pode-se derivar esta interpretação dos resultados encontrados por JANTSCH (1997).

Os seguintes cenários de pesquisa podem ser apontados:

- a) Utilização de trabalhos experimentais, semelhantes aos conduzidos por BARZEGAR et al. (1995), envolvendo a síntese de microagregados via CSUS, para os grupos de argilas predominantes nas condições tropicais. A fração argila do grupo de hematitas, goethitas, gibbsitas e caulinitas seriam isoladas dos solos, caracterizadas e associadas, em diferentes proporções, às frações silte e argila, sendo posteriormente submetidas à CSUS. Estudos quantitativos na formação das várias frações de agregados seriam realizados.
- b) Os materiais de solo, descrito anteriormente, seriam compactados e, posteriormente, submetidos a CSUS. Por meio de análises micromorfológicas, seria possível estudar os efeitos desses ciclos, provavelmente diferentes em função da mineralogia, na ruptura dos blocos compactados.

c) Realização de estudos micromorfológicos, qualitativos e quantitativos, dos efeitos dos CSUS em macroagregados de mineralogia variada, das principais unidades de mapeamento dos solos brasileiros.

Os trabalhos de OLIVEIRA (1992) e JANTSCH (1997), embora representem um avanço inicial significativo nessa direção, devem ser concebidos, para os solos brasileiros, como passos iniciais em busca da compreensão de um fenômeno complexo, intrigante e que representa um desafio constante à capacidade de compreensão e predição.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Na revisão de literatura discutiram-se os principais conceitos que deram suporte à hipótese de que as características dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS) aos quais o solo esteve submetido em condições naturais, devido à influência do fator climático, poderiam ser utilizadas em um modelo preditivo como estratificadoras no diagnóstico da propensão à densificação dos solos.

Para dar prosseguimento e aplicabilidade em condições de campo aos estudos desenvolvidos pelos pesquisadores envolvidos com o manejo e a conservação do solo dos Departamentos de Solos, Fitotecnia e Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, relativos à compreensão da dinâmica da formação de camadas densificadas envolvendo os CSUS, em várias regiões do território brasileiro, percebeu-se que seria necessário dispor de uma ferramenta que possibilitasse o estudo detalhado, tanto qualitativo como quantitativo, de seu regime hídrico pretérito, sob condições naturais.

Adicionalmente, esta ferramenta deveria ser capaz de processar, por critérios a serem definidos, as informações concernentes às outras variáveis de natureza física, sedimentológica, mineralógica e química do solo e, possivelmente, relativas à biota do solo, no diagnóstico de seu grau de propensão à densificação.

Essas informações seriam utilizadas, a princípio, em duas situações: a) estudos de transectos na paisagem, bastante utilizados nos estudos de pedologia e manejo do solo; e b) geração de mapas de uma nova classificação técnica do solo, proposta neste trabalho, estratificando os solos quanto à propensão à densificação.

Em razão da grande quantidade de cálculos e operações lógicas envolvidas, a busca de uma ferramenta já desenvolvida e que satisfizesse os requisitos necessários mostrou-se infrutífera. Assim, foram necessários a concepção e o desenvolvimento de um programa capaz de reconstituir o regime hídrico pretérito dos solos, via modelagem computacional, a partir de séries extensas de dados meteorológicos, considerando as informações pertinentes do perfil do solo e da vegetação, em adição às outras especificações anteriormente citadas.

Na análise inicial do sistema, e durante seu desenvolvimento, o programa foi estruturado para operar integrado a um sistema de informações geográficas (SIG). Esta integração se dá através de um gerenciador de banco de dados relacional, visando a automação dos procedimentos. Adicionalmente, o programa foi preparado para receber a implantação de um sistema especialista em sua estrutura. Este sistema será responsável pelo processamento dos dados do solo (sedimentológicos, físicos, químicos, etc.) e pelas informações geradas pela modelagem, concernentes às características dos CSUS citadas. Em outras palavras, será o componente responsável pela tomada de decisão final sobre o grau de propensão à densificação dos solos de cada extrato. Estas etapas constituem a evolução natural do programa, segundo as expectativas da equipe de desenvolvimento (Figura 6).

O desenvolvimento global do sistema foi previsto para se dar em três etapas:

- implementação do módulo básico capaz de gerar e gerenciar as informações sobre as características qualitativas e quantitativas dos CSUS;
- integração com o SIG; e
- integração com um sistema especialista.

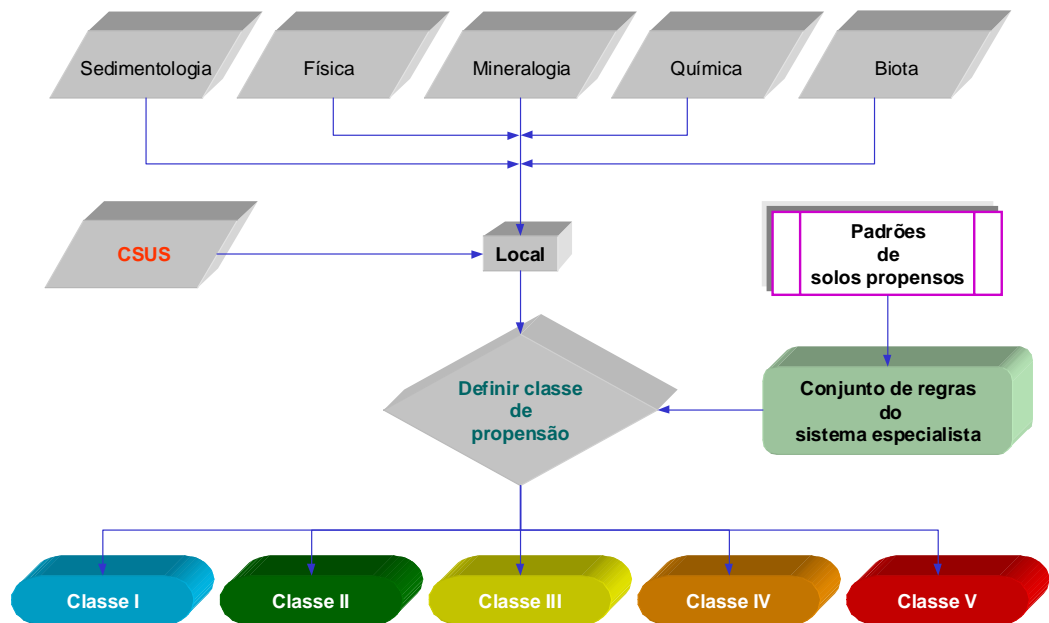


Figura 6 - Função do sistema especialista.

Explicar a concepção do programa e fornecer as informações necessárias aos pesquisadores interessados em sua aplicabilidade, bem como possíveis adaptações e ampliações, são os objetivos deste estudo.

3.1. Descrição do programa

Conforme comentado, o programa deveria estar preparado para atender à demanda de dois tipos de usuários interessados no estudo qualitativo e quantitativo do regime hídrico do solo, em condições de campo, via modelagem computacional: a) os interessados apenas no estudo de transectos na paisagem; e b) os que objetivam gerar mapas, em estudos regionais, através da integração do programa com sistemas de informações geográficas (SIG).

Para ambos, o conceito central do programa, que necessita ser bem entendido, é o local. Um local é uma entidade caracterizada pela presença de três componentes básicos, com seus dados correspondentes, que o representam: a) uma estação meteorológica; b) um perfil de solo; e c) uma vegetação predominante e homogênea.

Caracterizado o local, um outro conceito importante, e subsequente, é o projeto. Um projeto é conjunto não-vazio da entidade local. Adicionalmente, o programa trabalha com o conceito de pasta de trabalho, que nada mais é que um conjunto não-vazio da entidade projeto. Em outras palavras, uma pasta de trabalho é um conjunto de projetos e cada projeto é um conjunto de locais. Dessa forma, uma vez no programa, o usuário estará sempre trabalhando em apenas uma das pastas de trabalho e em apenas um dos projetos desta pasta, denominado projeto de trabalho.

As exigências da entidade local são necessárias para que o regime hídrico do solo possa ser modelado computacionalmente. Para isso, é necessário que os locais sejam cadastrados em um projeto e que exista a disponibilidade dos seguintes dados que o representam: dados meteorológicos da estação, preferencialmente obtidos a partir de séries extensas; dados analíticos do perfil do solo; e uma estimativa do coeficiente de evapotranspiração da vegetação predominante.

De posse desses elementos, o programa estará em condições de modelar o regime hídrico pretérito do solo, gerando informações qualitativas e quantitativas, que podem ser visualizadas tanto na forma numérica quanto gráfica, com enfoque detalhado nos CSUS do solo.

Para o primeiro grupo de usuários, ou seja, para aqueles interessados em estudos de transectos na paisagem, o cadastro de locais deve ser feito manualmente. O programa oferece uma interface integrada de cadastro, que facilita bastante esta tarefa. A perspectiva da equipe de desenvolvimento é de que o programa, na fase em que se encontra, seja capaz de satisfazer plenamente essa demanda.

Para o segundo grupo de usuários, isto é, para aqueles interessados na integração do programa com um SIG, com a finalidade de gerar mapas de uma nova classificação técnica ora proposta, ou seja, o diagnóstico dos solos de uma região quanto à propensão à densificação, são ainda necessárias algumas implementações: a) automação do cadastro de local a partir dos mapas exportados do SIG; e b) inclusão de um sistema especialista no programa, para a tomada de decisão final sobre o grau de propensão de cada local. Estas etapas encontram-se em fase de desenvolvimento, porém situam-se fora do escopo do presente trabalho.

O programa foi desenvolvido em Delphi (iniciado na versão 3 e concluído na versão 5), sob os sistemas operacionais Windows NT e Windows 95/98. O banco de dados utilizado foi o Paradox 7.

Todo o programa foi desenvolvido utilizando um sistema gerenciador de banco de dados relacional (SGBDR). Entretanto, em função de se ter utilizado uma camada intermediária para a programação, a “Borland Database Engine” (BDE), o programa não é condicionado ao Paradox. Esta opção, por sua vez, deveu-se à rapidez de processamento e pelo fato de ela ser de domínio público. Para ser substituído, basta gerar o conjunto de tabelas e integridades necessárias no SGBDR escolhido, utilizar o “link” necessário com a BDE e gerar o “alias”, e ele poderá ser utilizado pelo programa MapPDS sem nenhuma alteração no código-fonte do programa.

A documentação da fase de análise do sistema é apresentada nos Apêndices A e B.

3.1.1. A modelagem numérica

As modelagens envolvem simplificações da realidade complexa, em graus variados, de acordo com suas características. O método apresentado não foge à regra. Uma outra observação é que, quanto mais próximo dos fenômenos reais, maior o número de variáveis, analíticas ou sintéticas, que necessitam ser conhecidas e informadas para o modelo. Como consequência direta, maior o número de operações lógicas e aritméticas necessárias, o que implica em equipamentos e programas auxiliares capazes de suportarem essas operações.

Buscou-se, ao longo de todo o desenvolvimento do programa, um equilíbrio exequível entre facilidade de uso e exatidão. Em outras palavras, procurou-se minimizar o número de variáveis necessárias a ser informado e maximizar a potencialidade da aplicação dos resultados, segundo o objetivo original: caracterizar qualitativa e quantitativamente o regime hídrico pretérito dos solos em condições naturais, com ênfase no estudo dos CSUS do solo. Conforme citado, esta informação, em conjunto com outras propriedades inerentes ao solo, serão utilizadas, em uma segunda etapa do projeto global, na definição do grau de propensão à densificação dos solos.

Alguns pontos críticos comprometem a exatidão da modelagem proposta e, por conseguinte, merecem atenção detalhada. Estes pontos são discutidos a seguir.

3.1.2. Clima

As equações utilizadas para o cálculo da ETo foram: 1) Penman-Monteith (1991), 2) Blaney-Criddele FAO e 3) Hargreaves-Samani. Estas equações são utilizadas no programa nas prioridades 1 (máxima), 2 (intermediária) e 3 (mínima), de acordo com a disponibilidade diária de dados da estação meteorológica, representativa de um domínio climático em estudo.

Estudos de correlação com o método-padrão (lisímetro) e a posterior calibração destes métodos (obtenção de fatores de correção), de acordo com a região em que se estiver trabalhando, podem aumentar a exatidão da estimativa da ETo. Esta variável é fundamental e básica para todos os cálculos subseqüentes: balanço hídrico (BH), CSUS e suas estatísticas associadas.

3.1.3. Solo

3.1.3.1. Profundidade efetiva do solo: camada única vs. múltiplas camadas

O modelo em uso considera apenas uma camada do solo, ou seja, a profundidade desde a superfície até um limite estipulado pelo usuário (0,01 a 1,00 m). O balanço hídrico é calculado para esta camada simples do solo.

Estratificando-se o perfil em várias camadas e utilizando um modelo de balanço hídrico seqüencial (camada por camada, sucessivamente), seria possível aprimorar o modelo e torná-lo mais próximo do real. Obviamente, haveria ganho na exatidão da informação. Por outro lado, haveria aumento no grau de dificuldade de informar todos os dados e variáveis necessários.

Na versão atual, optou-se pela camada única.

3.1.3.2. Precipitação efetiva vs. velocidade de infiltração básica (VIB)

A precipitação efetiva – aquela fração da precipitação que realmente infiltra no perfil do solo sem provocar escoamento superficial – é dependente da velocidade de infiltração básica, informada no cadastro de perfil. Na ausência desta informação, o programa irá assumir um valor especificado na tela do cálculo do balanço hídrico para todos os locais do projeto.

Em qualquer um dos casos, o aspecto mais crítico é que os cálculos do balanço hídrico são feitos a partir dos valores médios diários. Esta decisão foi motivada pelo fato de:

- a maioria das estações meteorológicas realizar a leitura dos instrumentos apenas três vezes por dia (12, 18 e 24 h GW); e
- alguns órgãos não fornecerem os dados destas leituras, e sim as médias diárias correspondentes, já processadas.

Em ambos os casos, a precipitação registrada é acumulada: para o primeiro, em no mínimo seis horas, e, para o segundo, em 24 h. Portanto, em ambos, a modelagem em tempo real é impossível. O máximo permitido seriam três balanços hídricos diários, o que implica certo grau de inexatidão em relação a algumas variáveis envolvidas no balanço hídrico, principalmente o montante d'água perdido por escoamento superficial e por percolação profunda. Estas duas variáveis, portanto, ficam sub ou superestimadas.

Segundo BERNARDO (1995), de acordo com o valor apresentado para a velocidade de infiltração básica (VIB), os solos podem ser classificados em quatro categorias:

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| a) Solo de VIB muito alta | $> 30 \text{ mm h}^{-1}$ |
| b) Solo de VIB alta | $15-30 \text{ mm h}^{-1}$ |
| c) Solo de VIB média | $5-15 \text{ mm h}^{-1}$ |
| d) Solo de VIB baixa | $< 5 \text{ mm h}^{-1}$ |

Ao considerar um solo com uma VIB média (10 mm h^{-1} , por exemplo), em 24 horas, o solo seria capaz de suportar uma infiltração de 240 mm. Sabe-se que precipitações desta magnitude, em um dia, são muito raras. Somente a precipitação acumulada superior a este valor seria computada pelo programa como escoamento superficial.

Como o cálculo do balanço hídrico implementado é instantâneo, esta inexatidão não afeta o objetivo central do programa. Independentemente do montante infiltrado, a água que ficará retida é aquela definida pela capacidade total de armazenamento d'água (CTA). O único cuidado a ser tomado é não fornecer valores muito baixos e irreais para a precipitação efetiva e, ou, VIB.

Com a rede de novas estações automáticas controladas por satélite, que estão sendo instaladas no Brasil, é possível que em poucos anos os cálculos possam ser feitos de três em três horas, pois estas estações coletam automaticamente oito leituras em um intervalo de 24 horas.

3.1.3.3. Condutividade hidráulica do solo

O modelo simplificado de balanço hídrico utilizado não leva em consideração os valores da condutividade hidráulica da camada única considerada, ou seja, a partir do momento em que a água da precipitação infiltra no perfil do solo, o montante que exceder a CTA será percolado, sem as possíveis restrições da condutividade.

Este ponto pode ser melhorado, à medida que o programa for sendo utilizado e surgir demanda por esse tipo de refinamento. O perfil do solo pode vir a ser, inclusive, estratificado em várias camadas, cada qual com sua condutividade hidráulica. Neste caso, o modelo de balanço hídrico adotado seria seqüencial.

3.1.3.4. Solo úmido vs. solo seco

No modelo atual, o usuário informa os valores percentuais da umidade a partir dos quais o solo é considerado úmido e seco. Esta informação é prestada com base na capacidade total de armazenamento de água do solo (CTA).

Pensando-se em estabilidade dos agregados e nas condições físicas para sua fragmentação, relacionadas única e exclusivamente às características dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem, em que valores da umidade um solo pode ser considerado úmido? E seco?

Respostas para estas perguntas ainda estão por vir. Uma vez compreendidas, para cada tipo de solo, podem ser incorporadas ao programa.

3.1.4. Vegetação

3.1.4.1. Coeficiente de evapotranspiração da vegetação, K_v

A obtenção de valores dos coeficientes de evapotranspiração, K_v , para coberturas vegetais naturais, com as quais o programa necessita trabalhar, é outro ponto crítico.

Até o momento, não foi possível localizar na literatura dados a esse respeito. Assim, numa primeira instância, a recomendação natural é a extrapolação destes valores com base nos valores conhecidos de culturas com dossel aproximado ao das coberturas vegetais em questão.

Uma outra vertente poderia ser a modelagem deste valor a partir de informações facilmente obtidas no campo, como índice de área foliar, etc.

3.2. Concepção e desenvolvimento metodológico básico para a evolução do programa, visando o mapeamento quanto à propensão à densificação

Conforme citado, uma das características do programa foi sua concepção para trabalhar integrado a um SIG na geração de mapas. Esta integração se dá, basicamente, através do SGBDR. O MapPDS, como visto, foi totalmente desenvolvido sob este conceito. Os principais SIGs, ora disponíveis, apresentam várias possibilidades de lidar com esta tecnologia.

O objetivo da equipe de desenvolvimento foi testar uma das tecnologias disponíveis e verificar sua operacionalidade. Utilizando o ArcInfo como SIG, o método a seguir descrito foi testado, em caráter experimental, com êxito.

No SIG, cada “layer”, ou mapa temático, é denominado “coverage”. Uma “coverage” consiste de feições geográficas relacionadas topologicamente e seus dados descritivos associados. Assim, um mapa digital consiste, basicamente, de dois tipos de informações: espaciais (localização) e atributos (descritiva).

A topologia é um procedimento matemático utilizado para definir explicitamente um relacionamento espacial nos mapas vetoriais. As vantagens deste procedimento são: armazenar dados eficientemente, evitando redundâncias; permitir o processamento de operações espaciais, como “overlay” de polígonos; e estabelecer a conectividade entre arcos e análises de contigüidade. Caracteriza-se por apresentar rápido processamento. Seus princípios são:

Conectividade: arcos conectam-se uns com os outros através dos “nodes”.

Definição de área: arcos conectados vizinhos definem um polígono.

Contigüidade: arcos possuem direção, lado esquerdo e direito.

Pode-se perceber que o método (Figura 7) tem início no SIG e prossegue até a obtenção de um mapa, produto do cruzamento de vários outros, contendo apenas polígonos representativos de unidades homogêneas quanto aos critérios de clima, solo e vegetação (locais). Obtida esta informação, o fluxo do processo e das informações é desviado para o programa MapPDS.

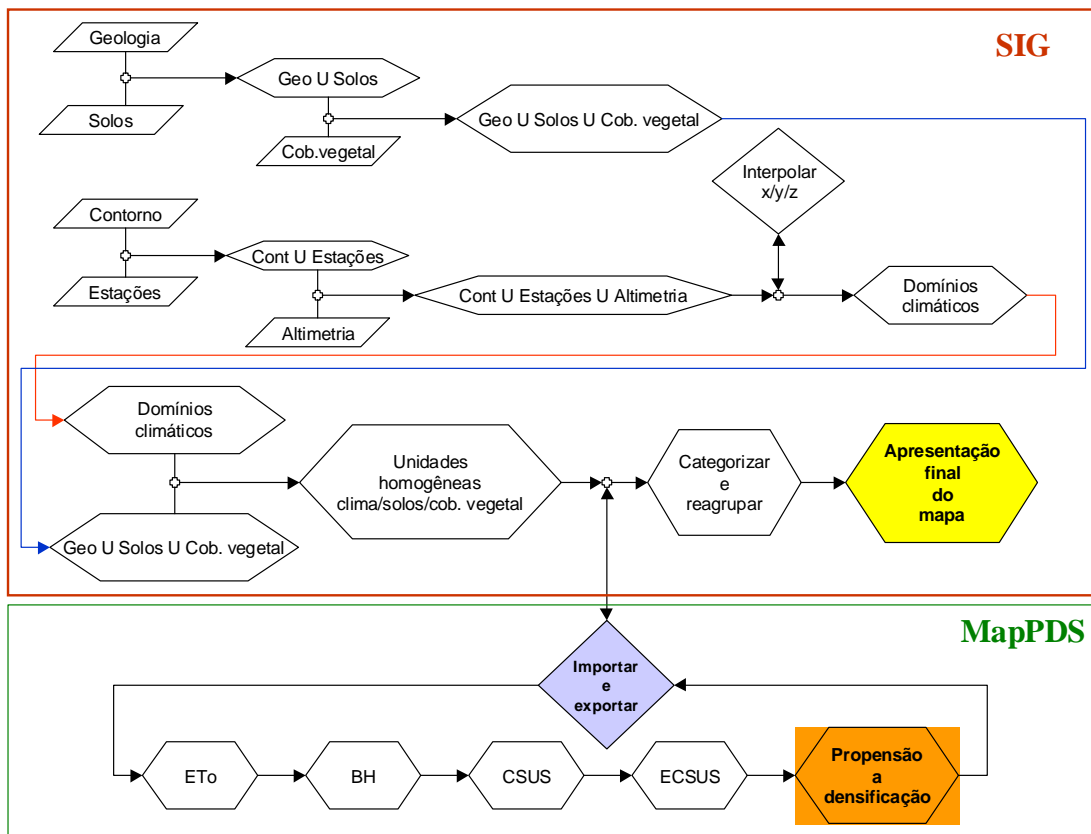


Figura 7 - Fluxograma básico do modelo, em que ETo = evapotranspiração de referência; BH = balanço hídrico; CSUS = ciclos sucessivos de umedecimento e secagem; ECSUS = estatísticas dos CSUS.

3.2.1. Edição inicial dos mapas temáticos

No SIG, a edição inicial dos mapas temáticos, necessários ao método, tem por objetivo identificar as feições geográficas, fornecendo, para cada uma delas, o conjunto das informações necessárias para o processamento posterior, de forma integrada, pelo MapPDS.

Um único identificador associa a feição espacial aos atributos descritivos, mantendo uma correspondência 1:1, isto é, "coverages" possuem as informações de atributos das feições armazenadas em tabelas, podendo estas estarem em banco de dados externos ao SIG. Uma vez que a conexão é estabelecida, podem-se mostrar as informações dos

atributos através da feição, ou criar um mapa, com base em atributos, armazenados na tabela de atributos. Este modelo é denominado “modelo georrelacional”, tratando-se de um modelo dual de banco de dados, inerente ao SIG estudado (ArclInfo) (ESRI, 1994).

Este SIG maneja três tipos de tabelas de atributos: tabela de feições dos atributos, arquivos de dados e tabelas de atributos externas em SGBDR, como: Oracle, Paradox, DBase, etc. Os arquivos de dados podem conter tanto feições como dados descritivos. Podem-se criar tabelas de atributos, adicionar dados a elas e associá-las a outros sistemas. Um aspecto importante é que cada feição geográfica, em uma “coverage”, é identificada por um único número da feição. Dados espaciais e atributos descritivos da feição são ligados por este número.

Em cada um dos mapas temáticos necessários (“coverages”) devem ser adicionados campos que associem as feições geográficas ao banco de dados residente do programa MapPDS. Esta operação tanto pode ser efetuada em um servidor de banco de dados relacional, utilizado pelo MapPDS, via mecanismos de exportação e importação de tabelas para o SIG, quanto utilizando os recursos do banco de dados residente do SIG. Outra opção é a utilização da “Spatial Database Engine”, oferecida pela empresa desenvolvedora do ArclInfo.

O MapPDS oferece, residente em seu banco de dados (Paradox), uma série de tabelas que serão utilizadas em vários processos ao longo dos procedimentos, para obtenção do mapa quanto à propensão dos solos à densificação. Assim, é essencial que sejam incluídos, em cada mapa temático, domínio climático, solos e cobertura vegetal e uma, ou mais, coluna (campo ou item) relacional, conforme o mapa temático, para que o programa tenha acesso às informações de forma padronizada, propiciando a automação posterior dos processos. A principal automação é o cadastro automático dos locais, necessário para modelagem do regime hídrico e caracterização dos CSUS.

Por exemplo, para cada polígono representativo de um domínio climático, deve ser acrescentado o campo que identifica a estação meteorológica à qual ele se encontra associado. Este campo deve possuir as seguintes características:

Domínio Climático	
Nome	CodEstação
Tipo	Inteiro
Tamanho	7

De forma similar, são realizados os mesmos procedimentos para os mapas temáticos solo e cobertura vegetal:

Solos			
Nome	CodSolo	SisClaSolo	CodPerfil
Tipo	Caracter	Caracter	Caracter
Tamanho	11	26	11

Vegetação		
Nome	CodVegetação	SisClaVegetação
Tipo	Caracter	Caracter
Tamanho	11	26

Nas tabelas das “coverages”, os campos relacionais devem ser adicionados após o campo <COVER_ID>, tantos quantos forem necessários. No exemplo de teste mostrado a seguir, pode-se verificar que foram adicionados três campos relacionais, CODSOLO, SISCLASOLO e CODPERFIL, na tabela associada à “coverage” solo (Figura 8).

solo	AREA	PERIMETER	SOLO_	SOLO_ID	CODSOLO	SISCLASOLO	CODPERFIL
1	320,527.16	2,492.10	2	1	01.00.00.00	Jacomine&Camargo(1995)	1003
2	273,911.75	2,363.26	3	2	01.00.00.00	Jacomine&Camargo(1995)	1002

Figura 8 - Tabela associada à coverage solo (solo.dbf), em que foram adicionados três campos relacionais: CodSolo, SisClaSolo e CodPerfil.

3.2.2. Processamento dos mapas temáticos

Uma vez digitalizados os mapas temáticos necessários e acrescentados os correspondentes campos relacionais, procede-se às operações de união (“overlay”) para se obterem as unidades homogêneas quanto aos critérios: clima, solo e vegetação. Este mapa (local) será exportado para o programa MapPDS por procedimentos disponíveis no SIG. No ArcInfo, o recurso testado com êxito foi o “SHAPE”.

Caso seja preciso optar por outro SIG, será necessário estudar uma forma conveniente de realizar os procedimentos citados, de acordo com os recursos do aplicativo específico.

No ArcInfo, durante o desenvolvimento do método, foram feitos procedimentos de “overlay” com a opção “join” das tabelas, até obtenção do mapa temático local (Figura 9). Com estes procedimentos, a tabela associada ao mapa “local” preservou todas as informações necessárias à automação dos procedimentos posteriores pelo MapPDS.

Em razão da edição anteriormente citada, cada polígono (local), após o “overlay”, deve trazer as seguintes informações descritivas associadas:

- a) Código do domínio climático ao qual pertence.
- b) Sistema de classificação dos solos ao qual pertence.
- c) Código do perfil ao qual pertence.
- d) Código da vegetação ao qual pertence.

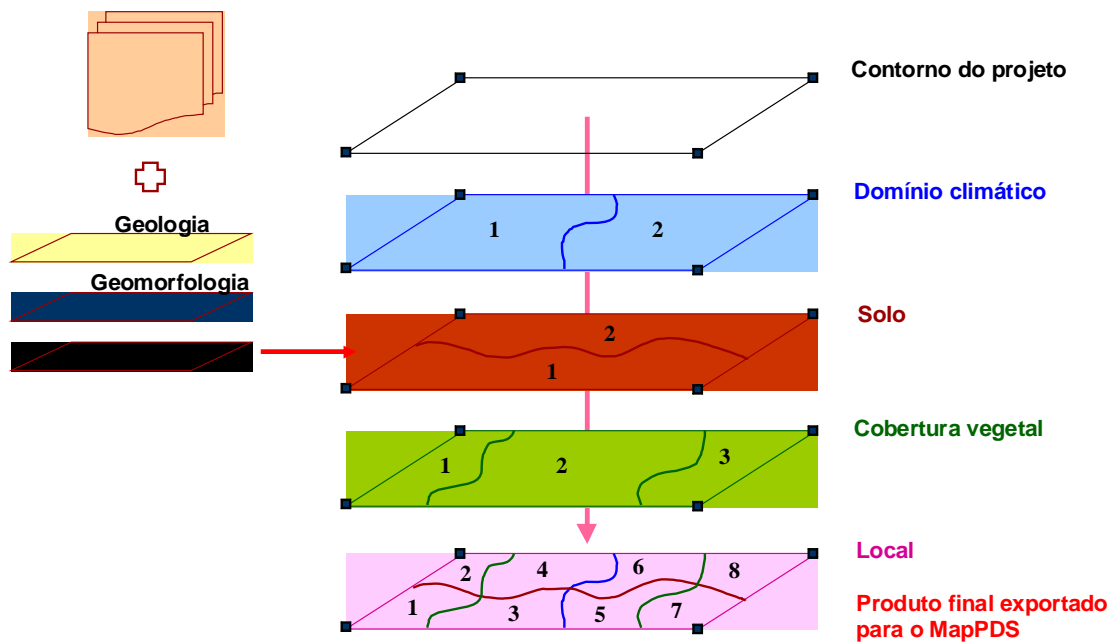


Figura 9 - Obtenção de unidades homogêneas (locais) no SIG. Os números identificam as unidades homogêneas de cada “coverage”.

Estas informações são necessárias, para o processamento posterior pelo MapPDS, na modelagem do regime hídrico e na caracterização tanto qualitativa quanto quantitativa dos CSUS aos quais o solo esteve submetido em condições naturais.

3.2.3. Exportação do mapa local para o MapPDS

Independentemente de como foi realizada a edição dos campos relacionais dos mapas temáticos, uma vez obtido o mapa “local”, este deve ser exportado. Um mapa exportado consiste de um arquivo principal, um arquivo de índice e uma tabela no formato dbf.

O arquivo principal é de acesso direto, de tamanho variável, em que cada registro descreve uma forma com uma lista de seus vértices. O arquivo de índice é um arquivo que permite o acesso direto aos registros do arquivo principal. A tabela dbf contém atributos das feições com um registro por feição. O relacionamento 1:1 entre atributo e geometria é baseado em um campo relacional.

3.2.4. Modelagem do balanço hídrico

A implementação do cadastro automático dos locais, por este método, encontra-se em fase de desenvolvimento.

Criado um projeto no MapPDS, e cadastrados os locais, via mecanismo de exportação do mapa local para o MapPDS, o passo seguinte é fazer a leitura dos dados das estações meteorológicas representativas dos vários domínios climáticos presentes.

Uma vez que todos os dados necessários estejam presentes no banco de dados do MapPDS, como os dados das estações meteorológicas, dados analíticos dos perfis do solo e dos coeficientes de evapotranspiração das coberturas vegetais e de cada unidade básica de mapeamento dos mapas temáticos originais, a seqüência para se obterem as características dos CSUS, via modelagem computacional, para cada local, será através da seqüência dos seguintes cálculos (o dicionário das equações do sistema encontra-se no Apêndice A):

- evapotranspiração de referência (ET_o);
- balanço hídrico (BH);
- ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS) do solo; e
- estatísticas dos CSUS (ECSUS).

Em síntese, até este ponto, exportado o mapa “local” conforme descrito e utilizando o recurso “Shape”, o programa MapPDS, através de uma rotina específica em desenvolvimento (cadastro automático de locais), irá preencher sua tabela, TLocal.db, de forma automática. Se todos os dados necessários, relativos aos perfis do solo e dos coeficientes de evapotranspiração das vegetações predominantes, tiverem sido adequadamente fornecidos, o programa terá condições de realizar os cálculos necessários via modelagem. O passo seguinte é submeter as informações originais (físicas, sedimentológicas, mineralógicas, etc.) e a caracterização dos CSUS a um sistema especialista.

3.2.5. Sistema especialista

Este componente será o elemento responsável pela definição do grau de propensão à densificação de cada local e poderá ser incorporado ao programa. Este componente realizará o processamento do conjunto dos dados, originais e gerados, relativos aos solos dos locais, segundo fatos e regras pre-estabelecidos, possibilitando a inferência (ROBINSON e FRANK, 1987) para cada projeto. O sistema especialista que tem sido estudado pela equipe de desenvolvimento é denominado "Clips". Trata-se de um componente não-visual, disponível para as linguagens de programação Delphi e Visual Basic, de domínio público e desenvolvido pela NASA.

O conjunto de fatos e regras decisórias (a base de conhecimento) para a definição do grau de propensão à densificação de cada local carece de desenvolvimento. Este é o principal ponto que necessita de aprofundamentos e evolução nos trabalhos de pesquisa. Nenhum programa computacional fará o que não se sabe fazer. Apenas, e tão-somente, realizará a tarefa de forma eficiente, rápida e precisa. Como o fenômeno é multivariado, será necessário definir regras claras para cada projeto e, possivelmente, a relação de peso entre as variáveis envolvidas.

A propensão à densificação de cada local deverá ser representada por um único valor numérico, associado a um campo específico, a ser inserido na tabela TLocal.db (por exemplo: GraProDenLocal).

3.2.6. Proposta de definição do grau de propensão à densificação

A definição das classes de propensão à densificação do solo, em sua primeira aproximação, é apresentada a seguir:

Classe I (muito pouco propenso): Sob condições naturais, não apresenta sintomas detectáveis de densificação. Sob atividade antrópica, por período igual ou superior a 10 anos, não apresenta sintomas de densificação que possam comprometer a infiltração das águas das chuvas médias da região ou afetar de forma prejudicial as atividades produtivas. Pode suportar dois ou mais ciclos de preparo e colheita ou estar sob pastoreio intenso com elevada densidade de animais por unidade de área.

Classe II (pouco propenso): Sob condições naturais, não apresenta sintomas detectáveis de densificação. Sob atividade antrópica, por período de 5 a 10 anos, apresenta sintomas fracos de densificação, podendo afetar fracamente a infiltração das águas das chuvas médias da região e ligeiramente as atividades produtivas. Pode suportar dois ou mais ciclos de preparo e colheita ou estar sob pastoreio com quantidade controlada de animais por unidade de área.

Classe III (medianamente propenso): Sob condições naturais, apresenta sintomas fracos de densificação. Sob atividade antrópica, por período de três a cinco anos, apresenta sintomas moderados de densificação que podem comprometer moderadamente a infiltração das águas das chuvas médias da região e afetar de forma considerável as atividades produtivas. Pode suportar no máximo um ciclo de preparo e colheita ou estar sob pastoreio moderado com manejo rotacionado.

Classe IV (propenso): Sob condições naturais, apresenta sintomas moderados de densificação. Sob atividade antrópica, por período de um a três anos, apresenta sintomas fortes de densificação, comprometendo fortemente a infiltração das águas das chuvas médias da região e afetando acentuadamente as atividades produtivas. Embora possa suportar atividades agropecuárias, estas somente são recomendáveis com a utilização de técnicas apropriadas e sob monitoramento contínuo.

Classe V (muito propenso): Sob condições naturais, apresenta sintomas fortes de densificação. Sob atividade antrópica por período igual ou inferior a um ano, apresenta sintomas muito fortes de densificação, comprometendo muito fortemente a infiltração das águas das chuvas médias da região e afetando severamente as atividades produtivas. É um solo recomendado para atividades silvícolas com a utilização de técnicas apropriadas. A pecuária, quando possível, pode ser explorada apenas extensivamente, com baixa densidade de animais por unidade de área.

Encerrada a etapa de cálculos, o usuário poderá visualizar o mapa no programa MapPDS, pois este deverá ser equipado com um componente, "Activex", que permite amplos recursos de visualização e descrição das feições geográficas. Estes componentes são produzidos e distribuídos pelas mesmas empresas desenvolvedoras dos SIGs.

A possibilidade de visualização, ainda no MapPDS, é extremamente importante. Através dela o usuário poderá obter informações, as mais variadas, sobre cada feição, além de ser possível visualizar o projeto em partes ou em seu todo. Com este recurso, o usuário poderá estabelecer, e entender, uma série de relações de causa e efeito. Para o SIG ArcInfo, este componente é denominado MapObjects.

3.2.7. Formulação e teste de hipóteses

O projeto de teste do método deve, necessariamente, conter solos em graus variados de densificação.

Para o projeto de trabalho em estudo, as hipóteses nula e alternativa poderão ser formuladas como a seguir:

H₀: O modelo não explica a atual distribuição dos solos densificados e, portanto, não permite prever as propensões dos solos ainda não incorporados ao processo produtivo.

H₁: O modelo explica a distribuição atual dos solos densificados e, portanto, permite prever as propensões dos solos ainda não incorporados ao processo produtivo.

A hipótese **H₀** será aceita, ou rejeitada, em função de sua antítese **H₁**, verificando, na bacia piloto, se as áreas de ocorrência de solos densificados encontram-se contidas nos limites físicos fornecidos pelo “Mapa de propensão à densificação” gerado pelo método, assim como a compatibilidade de ocorrência entre as categorias previstas e observadas em estudos de caso específicos.

Em caso de aceitação de **H₀**, será necessário rever o conjunto de regras decisórias fornecidas ao sistema especialista.

3.2.8. Importação do mapa de propensão à densificação

Em caso de rejeição de **H₀**, em favor de sua antítese **H₁**, o passo seguinte é a importação do mapa local, já com a propensão à densificação de cada polígono numericamente definida pelo SIG. Dessa forma, será

possível efetuar processos específicos no SIG para o agrupamento das unidades de mapeamento.

3.2.9. Editoração final do mapa de propensão à densificação

Nos trabalhos de editoração final, são definidos os detalhes de acabamento e apresentação final do mapa de propensão à densificação. São definidos nesta etapa cores de cada categoria, legendas, informações complementares, escala de apresentação, formas de recuperação das informações residentes em bancos de dados para os mapas digitais, entre outros.

3.3. Propensão quanto a densificação e uso do solo: refinamento do método

VOORHEES (1987) reconheceu a necessidade de desenvolver um método para avaliar a susceptibilidade dos solos à densificação e prever a resposta das plantas. Um método que utiliza teoria mecânica do solo, dados de pesquisa dos solos, séries extensas de dados meteorológicos e resultados de pesquisa de campo é apresentado em seu artigo. A concepção é de que, para cada combinação de cultura, solo e estação, existe um ótimo de densificação para a máxima produção. Abaixo ou acima deste ótimo observa-se decréscimo da produção. De forma geral, para os EUA, tem sido observado acréscimo da produção para as condições de déficit hídrico e redução para as estações úmidas. Para as estações secas, o acréscimo da produção para as condições ótimas de densificação tem sido atribuído à melhor germinação e ao uso mais eficiente do suprimento limitado de água. No caso das estações úmidas, o decréscimo tem sido atribuído à deficiência na aeração.

Para a agricultura de precisão, a proposta do autor é muito interessante, uma vez que, de posse de algumas informações, como maquinário a ser utilizado, solo e estação, o resultado final (acrécimo ou decréscimo) pode ser expresso em unidades monetárias por unidade de

área. Para as condições brasileiras, a sistematização das informações propostas para o mapeamento da propensão à densificação pode permitir caminhar, também, nesta direção no futuro.

3.4. Aplicação da modelagem do balanço hídrico: um estudo de caso

Selecionaram-se dois locais de ocorrência de Latossolo Roxo – Patos de Minas (latitude = 19°51'04" S, longitude = 44°38'02" W e altitude = 791,90 m) e Capinópolis (latitude = 18°40'48" S, longitude = 49°34'12" W e altitude = 564,00 m) – para um estudo de caso, com a finalidade de avaliar os resultados fornecidos pelo programa.

Para isso, selecionou-se uma série de dados fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, compreendida entre 01/01/1974 e 31/12/1978, portanto com cinco anos completos. Esta série foi escolhida em razão da boa qualidade de dados das duas estações meteorológicas, pelos critérios de consistência e continuidade.

Os dados analíticos do perfil do solo (capacidade de campo, -0,01 MPa = 32,82, e ponto de murcha, -1,5 MPa = 22,23, ambos em %, $g\ g^{-1}$) foram obtidos de JANTSCH (1997). Para os dois locais, a densidade do solo considerada foi de $1,0\ g\ cm^{-3}$, a velocidade de infiltração básica, de $100\ mm\ dia^{-1}$, a profundidade efetiva, de 0,10 e 0,20 m, e o coeficiente de evapotranspiração da cobertura vegetal, igual a 1,0, para todo o período.

Estudou-se, via modelagem comparativa, a influência do clima sobre as características dos CSUS dos solos dos dois locais. Posteriormente, simulou-se o adensamento progressivo do solo de Capinópolis, para avaliar seu efeito sobre as mesmas características. Realizou-se, também, um estudo sobre a influência dos limites para solo úmido e solo seco, utilizados pelo modelo, sobre algumas variáveis fornecidas pelo programa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. O programa

O primeiro resultado a ser considerado neste estudo é o programa desenvolvido, e o segundo é a avaliação de seu potencial como ferramenta de estratificação para possibilitar inferências.

O desenvolvimento de programas computacionais dificilmente pode ser visto como uma tarefa com início, meio e fim. Destas três etapas, apenas as duas primeiras são bem conhecidas dos desenvolvedores. Quanto à terceira, é sempre possível programar algo de forma diferente, mais eficiente, com menos codificação, etc.

Nesse sentido, alcançar um ponto em que o sistema satisfizesse a maioria dos usuários aos quais se destina e para os quais foi desenvolvido, com um mínimo de erros possível – uma vez que é bastante difícil, se não impossível, eliminar todas as suas possibilidades –, foi o objetivo almejado pela equipe de desenvolvimento. A expectativa desta é de que os objetivos básicos tenham sido alcançados. Espera-se que os usuários interessados no estudo e na caracterização do regime hídrico do solo, com ênfase nos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS) do solo, via modelagem computacional (Figura 10), tenham suas necessidades básicas satisfeitas.

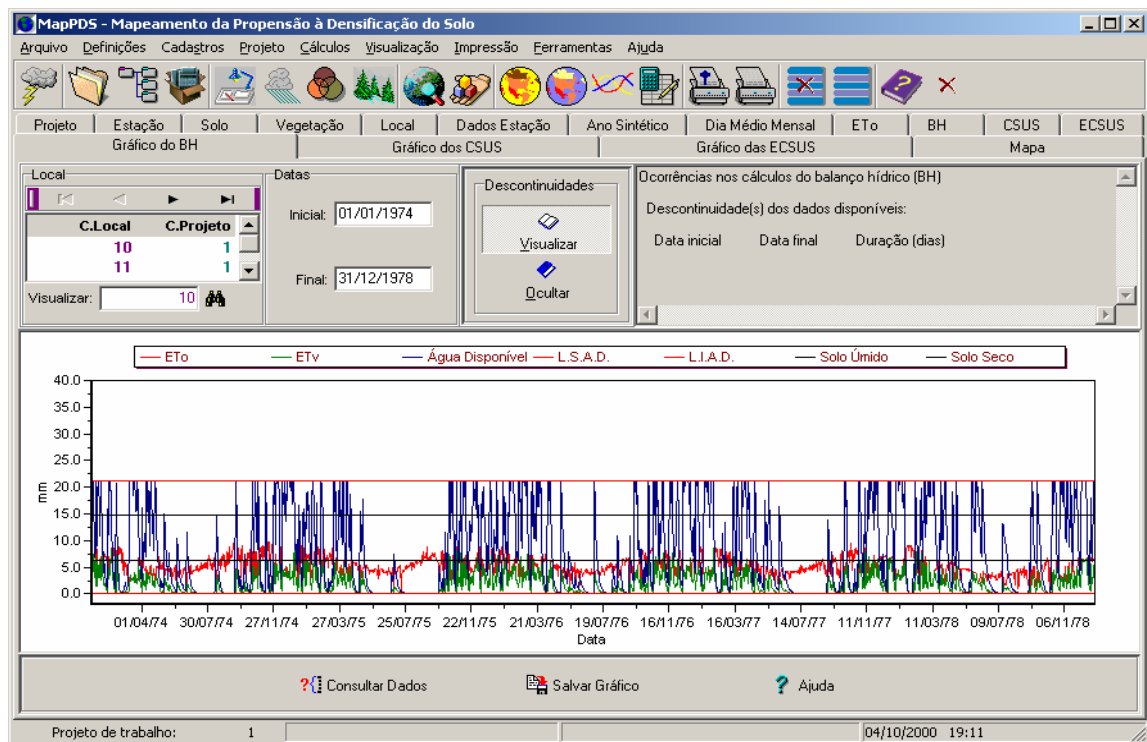


Figura 10 - Interface principal do programa, ilustrando um gráfico do balanço hídrico modelado.

A análise inicial do sistema mostrou-se consistente. Buscou-se a eliminação de quaisquer possíveis redundâncias no banco de dados, embora com o subsequente aumento da complexidade das consultas em “Structured Query Language” (SQL) à base de dados. Como a velocidade de processamento destas consultas é proporcional à sua complexidade, o conceito de atualização dos dados do projeto de trabalho foi desenvolvido e implementado. Seu significado é que, em seguida a quaisquer alterações na base de dados, relativas aos cálculos do projeto de trabalho, o usuário é solicitado a atualizar a interface de forma consciente.

Ao longo do período de codificação e testes, a análise inicial passou por várias alterações e adaptações. Esses processos são comuns no desenvolvimento de aplicativos. A expectativa da equipe de desenvolvimento é de que, no estágio atual, ele esteja em condições de fornecer as informações essenciais, e necessárias, para usuários interessados em sua compreensão e possíveis adaptações.

A linguagem de programação utilizada, Delphi, é considerada uma linguagem visual, orientada a objetos e voltada para o ambiente Windows. Optou-se por sua utilização, por se tratar de uma linguagem moderna e amplamente utilizada. Desse modo, é facilitada a obtenção posterior de serviços de suporte. Adicionalmente, foi possível:

- a) Aproveitar vários recursos gráficos desta plataforma de trabalho.
- b) Interagir com outros aplicativos.
- c) Trabalhar com banco de dados relacionais. O desenvolvimento sob o conceito banco de dados relacional facilita a recodificação de partes, visando adaptações a situações específicas.
- d) Manipular vários tipos de bancos de dados, de tamanhos variados, usando a força da linguagem SQL embutida.

Objetivou-se implementar uma interface amigável com o usuário. Em linguagens de programação orientada a eventos, como a utilizada, as facilidades proporcionadas possuem um custo. Embora não transparente para o usuário, sua implementação se deu à custa de milhares de linhas de código de programação. Novamente, o equilíbrio foi aqui buscado, ou seja, procurou-se oferecer uma interface ao usuário o mais amigável possível, sem prejuízos consideráveis ao desempenho global.

O programa possui recursos de exportação de dados para arquivos-texto, recursos de impressão e a possibilidade de exportação dos gráficos para a área de transferências do Windows, ou diretamente para arquivos, no formato "bitmap". Procurou-se oferecer uma integração satisfatória do programa com os aplicativos mais comuns utilizados nas atividades acadêmicas.

4.2. Estudo de caso

Para ilustrar os resultados fornecidos pelo programa, assim como avaliar de forma preliminar sua potencialidade como ferramenta estratificadora, estudou-se comparativamente, via modelagem, o regime hídrico pretérito de dois locais – Patos de Minas (latitude = -19,86, longitude = -44,64 e

altitude = 791,90 m) e Capinópolis (latitude = -18,68, longitude = -49,57 e altitude = 564,00 m) –, situados no Estado de Minas Gerais, ambos em região de ocorrência de Latossolo Roxo. Os resultados são a seguir apresentados e discutidos.

4.2.1. Estudo comparativo entre dois locais

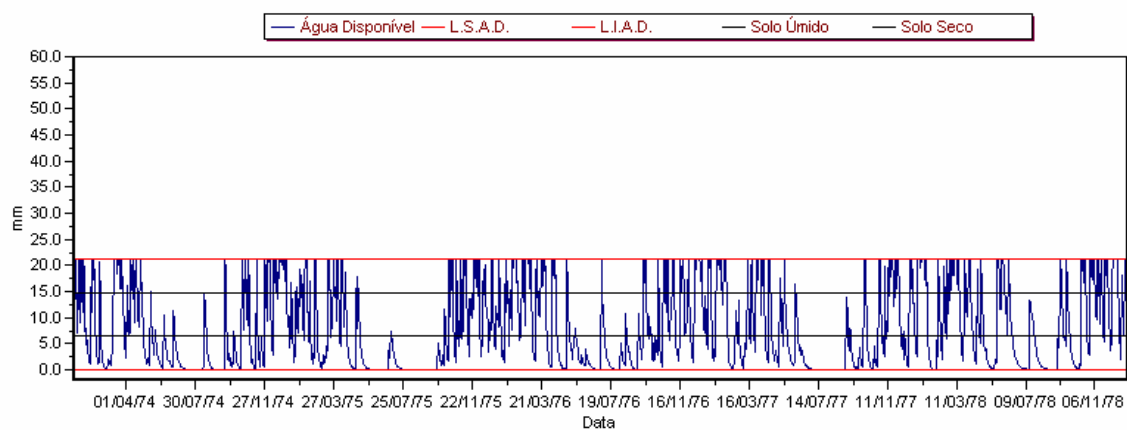
Os resultados (Figura 11 e Quadros 4 e 5), analisados em conjunto, sugerem uma condição mais conservadora da estrutura do solo para as condições de Patos de Minas, comparativamente a Capinópolis. É possível observar, em Patos de Minas, uma duração média maior dos estados úmido e seco, assim como uma velocidade média menor de umedecimento e secagem. Estes resultados são mais evidentes com a modelagem realizada a 0,20 m.

A conclusão possível de ser retirada é que, se um mesmo solo, sob a mesma cobertura vegetal, fosse submetido às condições meteorológicas de Patos de Minas e Capinópolis, com relação apenas aos CSUS, seria esperada uma maior densificação para as condições de Capinópolis e maior conservação para as condições de Patos de Minas.

Para conclusões mais abrangentes, sugerem-se estudos de caso considerando maior quantidade de locais e utilização de séries de dados meteorológicos mais extensas que a utilizada.

Observa-se, também, para as condições utilizadas, que as variáveis que permitiram melhor estratificação foram: duração média-seco, duração média-úmido e duração média-secando, nesta ordem. A duração média do umedecimento, utilizando-se médias diárias, não se mostrou uma variável promissora.

a) Patos de Minas



b) Capinópolis

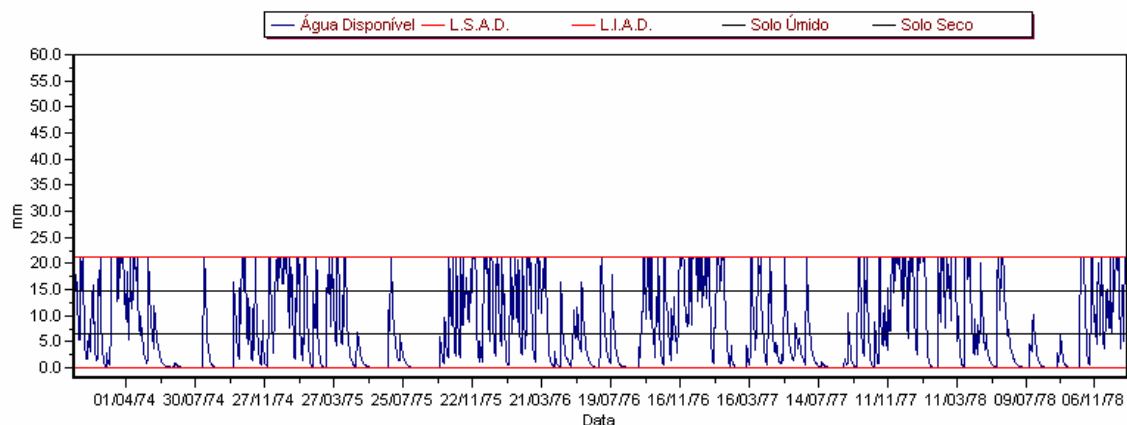


Figura 11 - Gráficos comparativos dos balanços hídricos modelados, em que L.S.A.D = limite superior d'água disponível e L.I.A.D = limite inferior d'água disponível.

Quadro 4 - Resultados comparativos fornecidos pelo programa, em dias, para a profundidade de 0,10 m (série: 01/01/1974 a 31/12/1978)

Variável	Patos de Minas (a)	Capinópolis (b)	Diferença (a-b)
Número total de dias - úmido	272	278	-6,00
Número total de dias - umedecendo	135	142	-7,00
Número total de dias - seco	1084	1066	18,00
Número total de dias - secando	232	235	-3,00
Número de vezes - úmido	66	74	-8,00
Número de vezes - umedecendo	109	110	-1,00
Número de vezes - seco	94	96	-2,00
Número de vezes - secando	109	111	-2,00
Média úmido	4,12	3,76	0,36
Desvio padrão - úmido	4,00	3,74	0,26
Média - umedecendo	1,24	1,29	-0,05
Desvio-padrão - umedecendo	0,56	0,58	-0,02
Média seco	11,53	11,10	0,43
Desvio-padrão - seco	18,08	18,55	-0,42
Média - secando	2,13	2,12	0,01
Desvio-padrão - secando	0,68	0,93	-0,25

Quadro 5 - Resultados comparativos fornecidos pelo programa, em dias, para a profundidade de 0,20 m (série: 01/01/1974 a 31/12/1978)

Variável	Patos de Minas (a)	Capinópolis (b)	Diferença (a-b)
Número total de dias - úmido	364	373	-9,00
Número total de dias - umedecendo	110	102	8,00
Número total de dias - seco	959	935	24,00
Número total de dias - secando	233	253	-20,00
Número de vezes - úmido	55	59	-4,00
Número de vezes - umedecendo	61	69	-8,00
Número de vezes - seco	56	63	-7,00
Número de vezes - secando	61	69	-8,00
Média úmido	6,62	6,32	0,30
Desvio-padrão - úmido	7,08	5,32	1,76
Média - umedecendo	1,80	1,48	0,32
Desvio-padrão - umedecendo	1,41	1,22	0,19
Média seco	17,13	14,84	2,29
Desvio-padrão - seco	25,10	28,04	-2,94
Média - secando	3,82	3,67	0,15
Desvio-padrão - secando	1,20	1,02	0,18

4.2.2. Simulação da densificação progressiva do solo de Capinópolis

Para esta modelagem, assumiram-se as mesmas condições anteriormente citadas, fixando-se a profundidade efetiva em 0,20 m e variando progressivamente a densificação (1,0 a 1,8 g cm⁻³) do solo de Capinópolis.

Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 12 e 13. Observa-se uma resposta exponencial positiva (Figura 13) das variáveis duração média-úmido e duração média-seco, com menor intensidade da duração média-secando, com o aumento linear da densidade.

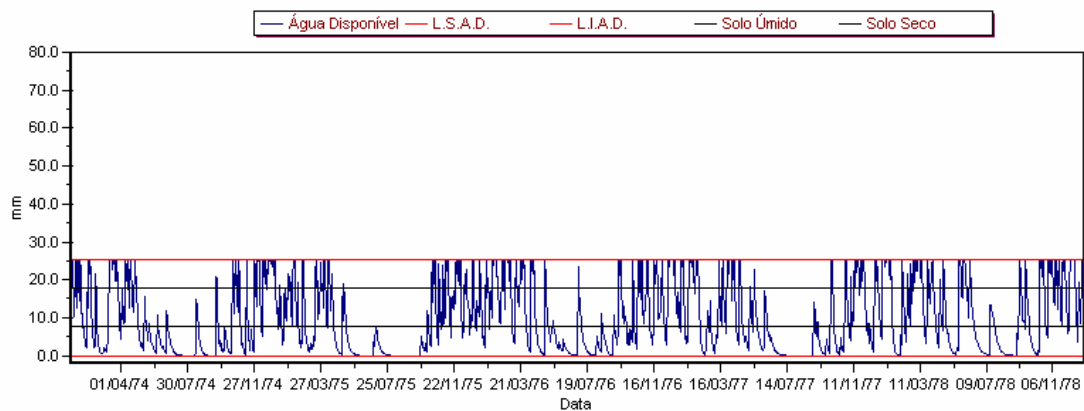
O aumento exponencial da duração média dos estados úmido, seco e do secamento pode ser interpretado como um mecanismo de proteção, ou conservação, da estrutura do solo, diante das forças dissipativas provocadas pelos CSUS, isto é, à medida que a densidade aumenta linearmente, para uma mesma profundidade fixa, a duração média dos estados úmido, seco e do secamento aumenta exponencialmente, e estes aumentos estão relacionados a uma redução, também progressiva, da intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem. Esta observação pode auxiliar na compreensão das causas, ou dos fatores, que aparentemente não permitem que um solo densifique contínua e progressivamente até situações extremas.

A redução progressiva do montante d'água das chuvas que pode infiltrar na superfície do solo também contribui para a manutenção da estrutura. Contudo, nestas condições, o escoamento superficial fica potencializado, e isto não pode ser considerado um mecanismo de conservação do solo como um todo.

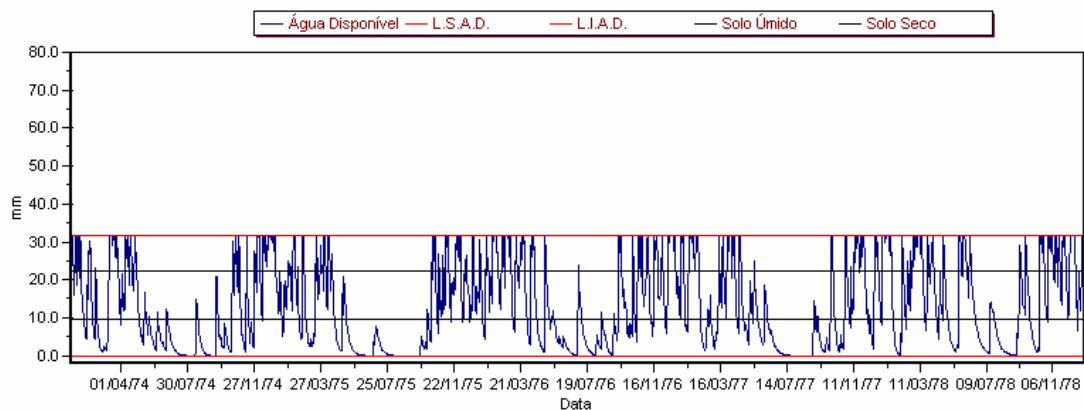
4.2.3. Influência dos limites adotados para solos úmido e seco sobre algumas variáveis fornecidas pelo programa

A influência dos limites utilizados pelo modelo para o solo ser considerado úmido ou seco foi estudada, via modelagem, para as condições de Patos de Minas. Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 14 e 15.

a) Capinópolis, modelado com $D_s = 1,2 \text{ g cm}^{-3}$



b) Capinópolis, modelado com $D_s = 1,5 \text{ g cm}^{-3}$



c) Capinópolis, modelado com $D_s = 1,8 \text{ g cm}^{-3}$

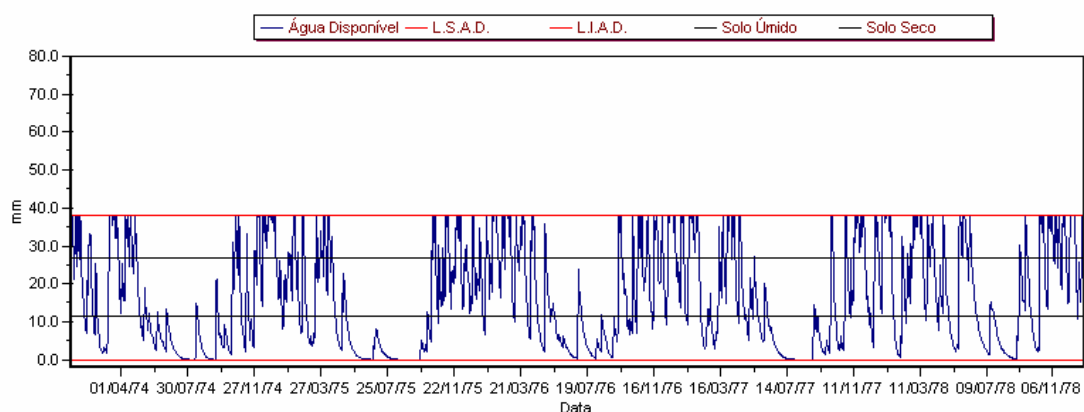


Figura 12 - Influência da densificação progressiva sobre o balanço hídrico e os CSUS de Capinópolis, considerando-se a profundidade efetiva fixa de 0,20 m, em que L.S.A.D = limite superior d'água disponível e L.I.A.D = limite inferior d'água disponível.

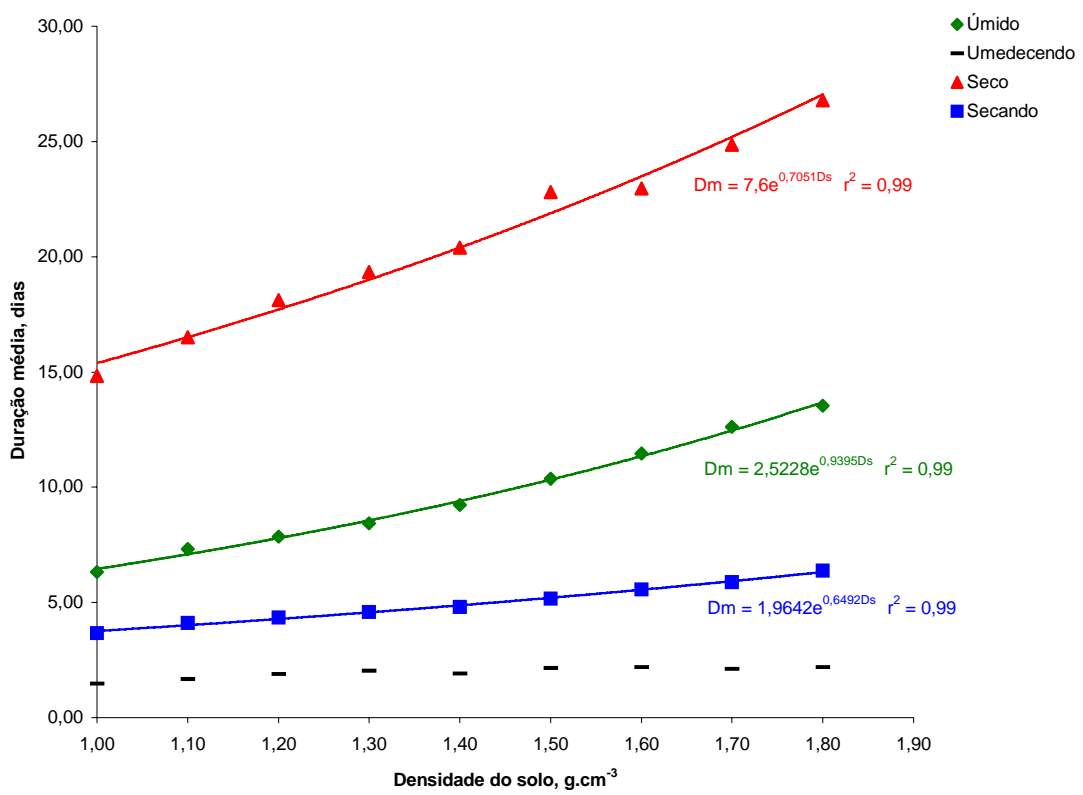
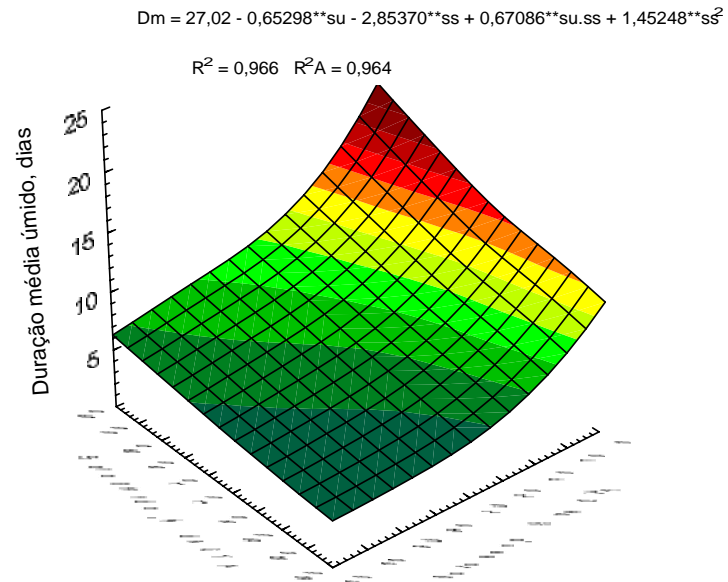


Figura 13 - Influência da densificação progressiva sobre as variáveis do modelo.

a)



b)

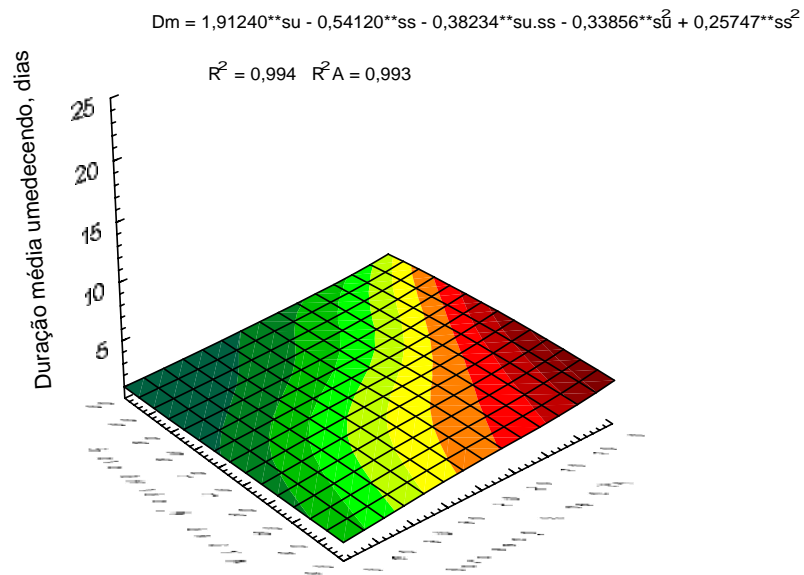
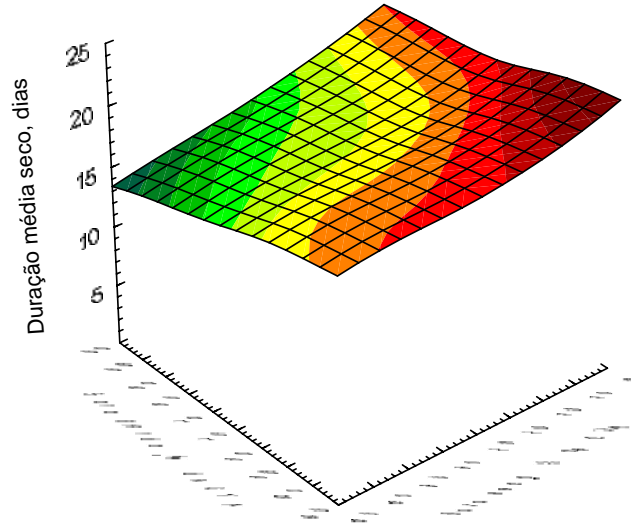


Figura 14 - Influência dos limites de umidade para o solo ser considerado úmido ou seco sobre as variáveis duração média-úmido (a) e duração média-umedecendo (b). R^2A = coeficiente de determinação ajustado.

a)

$$Dm = 16,34 + 0,49318**su - 1,71365**ss + 0,61325**su.ss + 0,53664**s^2$$

$$R^2 = 0,923 \quad R^2A = 0,919$$



b)

$$Dm = 3,31 + 0,99076**su - 2,02423**ss - 0,32009*su.ss - 0,59243*s^2 + 1,48538**ss^2$$

$$R^2 = 0,953 \quad R^2A = 0,950$$

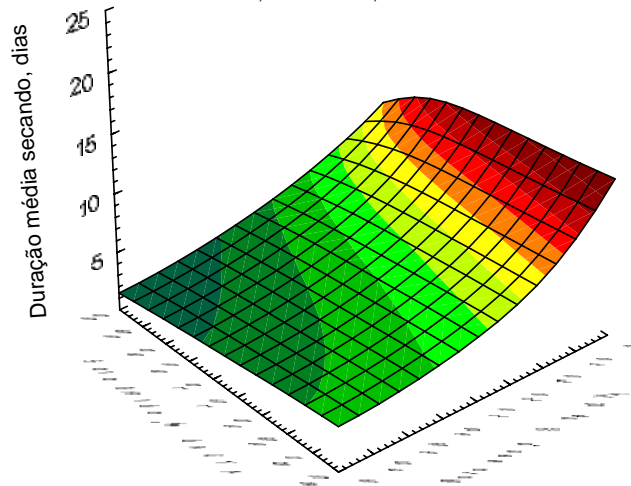


Figura 15 - Influência dos limites de umidade para o solo ser considerado úmido ou seco sobre as variáveis duração média seco (a) e duração média-secando (b). R^2A = Coeficiente de determinação ajustado.

Observa-se que há necessidade de cautela na adoção destes limites. Para os estudos anteriormente apresentados, considerou-se o solo úmido quando sua umidade era igual ou superior a 70% da capacidade total de armazenamento (CTA) e seco quando sua umidade era menor ou igual a 30% da CTA.

São necessários estudos para a identificação dos valores que possibilitem uma potencialização da capacidade de estratificação do modelo.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Em relação ao primeiro objetivo, ou seja, concepção e desenvolvimento do programa computacional, entende-se que foi alcançado um ponto em que o sistema satisfaz a maioria dos usuários aos quais se destina. Ele possibilita a caracterização qualitativa e quantitativa do regime hídrico pretérito do solo, com ênfase no estudo dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (CSUS), utilizando séries extensas de dados meteorológicos representativos de um local. Estas informações, em conjunto com outras propriedades do solo, poderão ser utilizadas na segunda etapa do projeto global, na definição do grau de propensão quanto à densificação dos solos.

Alguns pontos críticos citados a seguir comprometem a exatidão da modelagem proposta e, por conseguinte, merecem atenção adicional para a evolução do método.

As equações utilizadas para o cálculo da evapotranspiração de referência (Eto) foram: Penman-Monteith (1991), Blaney-Criddle FAO e Hargreaves-Samani. Estas equações foram utilizadas no programa nas prioridades 1 (máxima), 2 (intermediária) e 3 (mínima), de acordo com a disponibilidade diária de dados da estação meteorológica, representativa de um domínio climático em estudo. Estudos de correlação com o método-padrão (lisímetro) e a posterior calibração destes métodos para obtenção

dos fatores de correção, de acordo com a região em que se estiver trabalhando, podem aumentar a exatidão da estimativa da ETo.

O modelo em uso considera apenas uma camada do solo, ou seja, a profundidade efetiva do solo desde a superfície até um limite estipulado pelo usuário (0,01 a 1,00 m). O balanço hídrico foi calculado para esta camada simples do solo. Estratificando-se o perfil em várias camadas e utilizando um modelo de balanço hídrico seqüencial (camada por camada, sucessivamente), seria possível aprimorar o modelo e torná-lo mais próximo do real.

A precipitação efetiva - aquela fração da precipitação que realmente infiltra no perfil do solo sem provocar escoamento superficial - é dependente da velocidade de infiltração básica, informada no cadastro de perfil. Na ausência desta informação, o programa assume um valor especificado na tela do cálculo do balanço hídrico para todos os locais. Em qualquer um dos casos, o aspecto mais crítico é de que os cálculos do balanço hídrico são feitos a partir dos valores diários. Esta decisão foi motivada pelo fato de:

- a maioria das estações meteorológicas realizar a leitura dos instrumentos apenas três vezes por dia (12, 18 e 24 h G.W.); e
- alguns órgãos não fornecerem os dados destas leituras, e sim as médias diárias correspondentes, já processadas.

Em ambos os casos, a precipitação registrada é acumulada. Para o primeiro, em no mínimo seis horas, e, para o segundo, em 24 horas. Portanto, em ambos, a modelagem em tempo real é impossível. O máximo permitido seriam três balanços hídricos diários, o que implica certo grau de inexatidão em relação a algumas variáveis envolvidas, principalmente o montante d'água perdido por escoamento superficial e por percolação profunda. Estas duas variáveis, portanto, ficam sub ou superestimadas.

O modelo simplificado de balanço hídrico utilizado não leva em consideração os valores da condutividade hidráulica da camada única considerada, ou seja, uma vez que a água da precipitação infiltre no perfil do solo, o montante que exceder a CTA será percolado, sem as possíveis restrições da condutividade. Este ponto pode ser melhorado à medida que o programa for sendo utilizado e surgir demanda por este tipo de refinamento.

Os valores adotados de umidade para um solo ser considerado úmido e seco influenciam os resultados obtidos pelo programa. São necessários estudos de caso para a definição dos valores que potencializam a capacidade de estratificação da modelagem proposta.

Detectou-se carência de informações dos coeficientes de evapotranspiração, K_v , para coberturas vegetais naturais, com as quais o programa necessita trabalhar. Numa primeira instância, a recomendação natural é a extrapolação destes valores com base nos valores conhecidos de culturas com dossel aproximado do das coberturas vegetais em questão.

Em relação ao segundo objetivo, ou seja, avaliação preliminar do potencial de estratificação de ambientes, pode-se concluir que a modelagem apresentou resultados bastante promissores. Observou-se que as condições meteorológicas de Patos de Minas mostraram-se mais conservadoras da estrutura do solo do que as de Capinópolis. As variáveis que permitiram melhor estratificação foram: duração média do estado seco, duração média do estado úmido e duração média do secamento.

Para as condições de Capinópolis, as variáveis anteriormente citadas apresentaram aumento exponencial em resposta a um acréscimo linear da densidade do solo, mantendo-se fixa a profundidade efetiva, tendo esta observação sido associada a um possível mecanismo de conservação natural da estrutura do solo.

Os limites adotados para o solo ser considerado úmido ou seco influenciaram os resultados da modelagem. São necessários estudos mais detalhados para determinação das combinações ótimas para estes locais.

Em relação ao terceiro objetivo, isto é, concepção de um método para possibilitar o mapeamento do solo quanto à propensão à densificação, pode-se concluir que o proposto foi testado em modelos simplificados, tendo se mostrado operacionalmente viável. Os possíveis pontos de estrangulamento, para projetos de grandes proporções, com volume de processamento muito elevado, podem ser superados com a utilização de sistemas gerenciadores de banco de dados relacionais (SGBDR) mais poderosos que o utilizado.

A definição das classes de propensão à densificação do solo, em sua primeira aproximação, foi proposta e apresentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, W.A.P. **Gênese de camadas adensadas em solos de tabuleiros costeiros no sul da Bahia**. Viçosa, UFV, 1995, 114p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. **Eur. J. Soil Sci.**, 46:161-168. 1995.
- AL-DURRAH, M.M., BRADFORD, J.M. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 46:1086-1090. 1982.
- ARORA, H.S., COLEMAN, N.T. The influence of electrolyte concentration on flocculation of clay suspensions. **Soil Sci.**, 127:134-139. 1979.
- BARZEGAR, A.R., RENGASAMY, P., OADES, J.M. Effects of clay type and rate of wetting on the mellowing of compacted soils. **Geoderma**, 68:39-49. 1995.
- BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 6ed. Viçosa, Imprensa Universitaria. 657p. 1995.
- BISDOM, E.B.A; DEKKER, L.W., SCHOUTE, J.F.Th. Water repellency of sieved fraction from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. **Geoderma**, 56:105-118. 1993.

- BOLT, G.H. Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clay. **Geotechnique**, V.6, N.2, pp.86-93. 1956.
- BRESSON, L.M., BOIFFIN, J. Morphological characterization of soil crust development stages on experimental field. **Geoderma**, 47:201-325. 1990.
- BRESSON, L.M., MORAN, C.J. Structural change induced by wetting and drying in seedbeds of a hardsetting soil with contrasting aggregate size distribution. **Eur. J. Soil Sci.**, 46:205-214. 1995.
- BRESSON, L.M., VALENTIN, C. **Soil surface crust formation: contribution of micromorphology**. In: RINGOSE-VORSE, A.J., HUMPHREYS, G.S. (Eds.) *Micromorphology, Studies in Management and Genesis* pp.737-762. Elsevier, Amsterdam. 1994.
- BRUBAKER, S.C., HOLZHEY, C.S., BRASHER, L.D. Estimating the water-dispersible clay content of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 56:1227-1232. 1992.
- CARDOSO, D.L. **Contribuição à identificação e tratamento de solos expansivos da região de Viçosa-MG**. Viçosa, UFV, 1994. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- CARVALHO JÚNIOR, I.A. **Estimativa de parâmetros sedimentológicos para estudo de camadas compactadas e/ou adensadas em Latossolo de textura média sob diferentes usos**. Viçosa, UFV, 1995, 83p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- CARVALHO, A.F. **Emprego da agitação horizontal na avaliação da estabilidade de agregados de cinco solos da região sudeste**. Viçosa, UFV, 1991, 73p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- CASIMIR, H.B.G., POLDER, D. The influence of retardation of the London-van der Waals forces. **Physical Review**, V.73, p.360. 1948.
- CHAN, K.Y., MULLINS, C.E. Slaking characteristics of some Australian and British soils. **Eur. J. Soil Sci.**, v.45, p.273-283. 1994.
- CHAPMAN, D.L. A contribution to the theory of electrocapillarity. **Philosophical Magazine**, v.25, n.6, p.475-481. 1913.
- COLLIS-GEORGE, N., GREENE, R.S.B. The effect of aggregate size on the infiltration behavior of a slaking soil and its relevance to pounded irrigation. **Aust. J. Soil Res.**, v.17, p.65-73. 1979.

- COSTA, L.M., ABRAHÃO, W.A.P. Compactação e adensamento de solos relacionados às propriedades químicas, físicas e sedimentológicas. In: ALVAREZ V., V.H., FONTES, L.E.F., FONTES, M.P.F.F. (Eds.) O Solo nos grandes domínios morfológicos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG, SBCS, UFV, DPS, 1996.
- DEGENS, B.P. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. **Aust. J. Soil Res.**, v.35, p.431-459, 1997.
- DEJARGUIM, B.V. The force between molecules. **Scientific American**, v.203, n.1, p.47, 1960.
- EL-SWAIFY, S.A., AHMED, S., SWIDALE, L.D. Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red and black earths. II. Liquid limit, degree of dispersion, and soil moisture retention. **J. Soil Sci.**, v.21, p.188-198, 1970.
- EMERSON, W.W. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. **Aust. J. Soil Res.**, v.5, p.47-57, 1967.
- EMERSON, W.W. **Physical properties and structure**. In: RUSSEL, J.S., GREEN, E.L. (Eds.) Soil factors in crop production in a semi-arid environment. Queensland Univ. Press, Brisbane, pp.78-104. 1977.
- EMERSON, W.W. The slaking of soil crumbs as influenced by clay mineral composition. **Aust. J. Soil Res.**, v.2, p.211-217, 1964.
- ESRI. **ARC/INFO data management: concepts, data models, database design and storage**. Environment Systems Research Institute, INC. USA. 1994.
- FARIA, J.C., SCHAEFER, C.E.R., HUIZ, H.A., COSTA, L.M. Effects of weed control on physical and micropedological properties of a Brazilian ultisol. **R. Bras. Ci. Solo**, v.22, n.4, p.731-741, 1998.
- FERNANDES, R.B.A. **Influência das características químicas, físicas e mineralógicas na compactação de três Latossolos**. Viçosa, UFV, 1996, 117p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- FRANK, H.S. Covalence in the hydrogen bond and the properties of water and ice. **Proceedings of the Royal Society London**, A247, pp.481-492. 1958.
- GILLMAN, G.P. The influence of net charge on water dispersible and sorbed sulphate. **Aust. J. Soil Res.**, v.12, p.173-176, 1974.

- GJORUP, G.B. **Influência da carga dependente de pH e do alumínio trocável no teor de argila dispersa em água.** Viçosa, UFV, 1992, 41p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1992.
- GOLDBERG, S., GLAUBIG, R.A. Effect of saturation cation, pH and aluminium and iron oxide on the flocculation of kaolinite and montmorillonite. **Clays Clay Miner.**, v.35, p.220-227, 1987.
- GOLDBERG, S., SUAREZ, D.L., GLAUBIG, R.A. Factors affecting clay dispersion and aggregates stability of arid zone soils. **Soil Sci.**, v.146, p.317-3125, 1988.
- GOMES, T.C.A. **Análise de trilha no estudo de fatores físicos e químicos relacionados ao adensamento e, ou, à compactação em dois solos do norte de Minas Gerais.** Viçosa, UFV, 1996, 105p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- GOUY, G. Sur la constitution de la charge electrique a la surface d'un electrolyte. **Annue Physique** (Paris), Serie 4, v.9, p.457-468, 1910.
- GRANT, C.D., DEXTER, A.R. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of molded soil during rapid wetting. **Aus. J. Soil Res.**, v.28, p.361-369. 1990.
- GUSLI, S., MACLEOD, D.A., BLACKWELL, P.S. Structural collapse and strength of some Australian soils in relation to hardsetting: I. Structural collapse on wetting and draining. **Eur. J. Soil Sci.**, v.45, p.15-21, 1994.
- HUSSEIN, J., ADEY, M.A. Changes in microscruture, voids and b-fabric of surface samples of a vertisol caused by wet/dry cycles. **Geoderma**, v.85, p.63-82, 1998.
- HUSSEIN, J., ADEY, M.A. Changes in scruture and tilth mellowing in a vertisol due to wet/dry cycles in the liquid and vapour phases. **Eur. J. Soil Sci.**, v.46, p.357-368, 1995.
- IWATA, S., TABUCHI, T., WARKETIN, B.P. **Soil-water interactions (books in soil and the environment).** Marcel Dekker, New York. 1988.
- JANTSCH, R.L. **Estado de agregação de materiais de latossolos submetidos a calagem em diferentes condições de temperatura e umidade relativa.** Viçosa, UFV, 1997. 78p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1997.

- JUMA, N.G. Interrelationship between soil structure/texture, soil biota/soil organic and crop production. **Geoderma**, v.57, p.3-30, 1993.
- JUSCKSCH, I. **Calagem e dispersão de argila em amostras de um Latossolo Vermelho-Escuro**. Viçosa, UFV, 1987, 37p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1987.
- JUSCKSCH, I. **Meios mecânicos e concentração de NaOH na dispersão e estabilidade de suspensões de argila**. Viçosa, UFV, 1995, 50p. Dissertação (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- KEMPER, W.D., ROSENAU, R.C., NELSON, S. Gas displacement and aggregate stability of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.49, p.25-28, 1985.
- KHEYRABI, D., MONNIER, G. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. **Annales Agronomiques**, v.19, p.129-152, 1968.
- KRETZSCHMAR, R., ROBARGE, W.P., WEED, S.B. Flocculation of kaolinite soil clays: effects of humic substances and iron oxides. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.57, p.1277-1287, 1993.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: EPU, 1986. 319p.
- LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assesment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.*, v.47, p.425-437, 1996.
- LE BISSONNAIS, Y. Contribution à l'étude de la dégradation structurale superficielle: analyse des processus de microfissuration des agrégates par l'eau. **Science du Sol**, v.27, p.187-199, 1989.
- LEY, G.J., MULLINS, C.E., LAL, R. Hardsetting behavior of some structurally weak tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v.13, p.365-381, 1989.
- LOCH, R.J. A method for measuring aggregate water stability with relevance to surface seal development. **Aust. J. Soil Sci.**, v.32, p.687-700, 1994.
- LONDON, F. The general theory of molecular forces. **Transactions of the Faraday Society**. Vol. 33, No.8. 1937.
- LOW, P.F. Physical chemistry of clay-water interaction. **Advances in Agronomy**, Academic, v.13, p.269-327, 1961.

- MACINTYRE, D.S. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. **Aust. J. Soil Res.**, v.17, p.308-312, 1979.
- MALTONI, K.L. **Estudo de compactação e/ou adensamento em subsuperfície para Latossolos sob diferentes usos.** Viçosa, UFV, 1994, 139p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior.** Berkeley: University of California, John Wiley, 1976. 422p.
- MOORE, C.A, MITCHELL, J.K. Electromagnetic force and soil strength. **Geotechnique**, Vol. 24, No. 4, pp.627-640. 1974.
- MULLINS, C.E., BLACKWELL, P.S., TISDALL, J.M. Strength development during drying of a cultivated, flood-irrigated hardsetting soil: I. Comparison with a structurally arable soil. **Soil & Tillage Research**, v.25, p.113-128, 1992.
- MULLINS, C.E., CASS, A., MACLEOD, D.A., BLACKWELL, P.S. Structural collapse and strength of some Australian soils in relation to hardsetting: II. Tensile strength of collapsed aggregates. **Eur. J. Soil Sci.**, v.45, p.23-29, 1994.
- MULLINS, C.E., MACLEOD, D.A., NORTHCOTE, K.H., TISDALL, J.M. YOUNG, I.M. Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. **Adv. Soil Sci.**, v.11, p.37-108, 1990.
- NEARING, M.A, BRADFORD, J.M. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.49, p.547-552, 1985.
- NORRISH, K. Forces between clay particles. **Proc. Int. Clay Conf.**, Madrid, 375-383. 1972.
- OADES, J.M. Interactions of polycations of aluminium and iron with clays. **Clays Clay Miner.**, v.32, p.49-57, 1984.
- OADES, J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, v.56, p.377-400, 1993.
- OLIVEIRA, L.C.A. **Comportamento de colóides e microagregados em colunas de materiais de dois Latossolos submetidos a sucessivos ciclos de umedecimento e secagem.** Viçosa, UFV, 1994, 63p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1994.

- OLIVEIRA, T.S. **Efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem sobre propriedades físicas e químicas de quatro latossolos brasileiros.** Viçosa, UFV, 1992. 104p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1992.
- OLSON, R.E., MESRI, G. Mechanisms controlling the compressibility of clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division.** A.S.C.E., Vol. 96, No. SM6, pp.1863-1878. 1970.
- PANABOKKE, C.R., QUIRK, J.R. Effect on initial water content on stability of soil aggregates in water. **Soil Sci.**, v.83, p.185-195, 1957.
- QUIRK, J.P., PANABOKKE, C.R. Incipient failure of soil aggregates. **J.Soil Sci.**, v.13, p.60-69, 1962.
- RASIAH, V., KAY, B.D. Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.58, p.935-942, 1994a.
- RASIAH, V., KAY, B.D. Characterizing rate of wetting: impact on structural desestabilization. **Soil Sci.**, v.160, p.176-182, 1995.
- RASIAH, V., KAY, B.D. Quantifying the changes in clay stabilization after introduction of forages. **Soil Sci.**, v.157, p.318-327, 1994 b.
- ROBINSON, D.O., PAGE, J.B. Soil aggregate stability. **Soil Sci. Soc. Am. Proceeding**, v.14, p.25-29, 1950.
- ROBINSON, V.B., FRANK, A.U. Expert system for geographic information system. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.53, p.1435-1441, 1987.
- SCHAEFER, C.E.R. The microstructure of latosols as long-term biotic constructs. **XIII Congresso Latino Americano de Ciência do Solo.** Águas de Lindóia, São Paulo. 1996.
- SETA, A.K., KARATHANASIS, A.D. Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. **Geoderma**, v.74, p.255-266, 1996.
- SHAINBERG, I., CAISERMAN, A. Studies on Na/Ca montmorillonite system. II. The hydraulic conductivity. **Soil Sci.**, v.111, p.276-281, 1971.
- SHAINBERG, I., LEVI, G.J., RENGASAMY, P., FRENKEL, H. Aggregate stability and seal formation as affected by drop's impact energy and soil amendments. **Soil Sci.**, v.154, p.113-119, 1992.

- SHIEL, R.S., ADEY, M.A., LODDER, M. The effect of successive wet/dry cycles on aggregate size distribution in a clay texture soil. **Journal of Soil Science**, v.39, p.71-80, 1988.
- SINGER, M.J., SOUTHARD, R.J., WARRINGTON, D.N.; JANITZKY, P. Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.56, p.1843-1848, 1992.
- STERN, O. Zur theory der elektrolytischen doppelschicht. **Zeitschrift Electrochem**, v.30, p.508-516, 1924.
- SUAREZ, D.L., RHOADES, J.D., LAVADO, R., GRIEVE, C.M. Effect of pH on the saturated hydraulic conductivity and soil dispersion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.48, p.50-55, 1984.
- SULLIVAN, L.A. Soil organic matter, air encapsulation and water-stable aggregation. **J. Soil Sci.**, v.41, p.529-534, 1990.
- TISDALE, J.M., OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **J. Soil Sci.**, v.33, p.141-163, 1982.
- TRUMAN, C.C., BRADFORD, J.M., FERRIS, J.E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.54, p.1385-1392, 1990.
- UTOMO, W.H., DEXTER, A.R. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. **J. Soil Sci.**, v.33, p.623-637, 1982.
- van OLPHEN, H.N. **Introduction to clay colloid chemistry**. Wiley Interscience, New York. 1963.
- VOORHEES, W.B. Assessment of soil susceptibility to compaction using soil and climatic data bases. **Soil & Tillage Research**, v.10, p.29-38, 1987.
- WEAICH, K., BRISTOW, K.L., CASS, A. Pre-emergent shoot growth of maize under different drying conditions. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.56, p.1272-1278, 1992.
- YARON, B., THOMAS, G.W. Soil hydraulic conductivity as affected by sodic water. **Water Resour. Res.**, v.4, p.545-552, 1968.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J. Am. Soc. Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.

APÊNDICES

APÊNDICE A

1. Diagrama de entidades e relacionamentos

O diagrama de entidades e relacionamentos pode ser visualizado na Figura 1A.

2. Normalização

As entidades do sistema estão normalizadas e seus atributos são descritos no Quadro 1A.

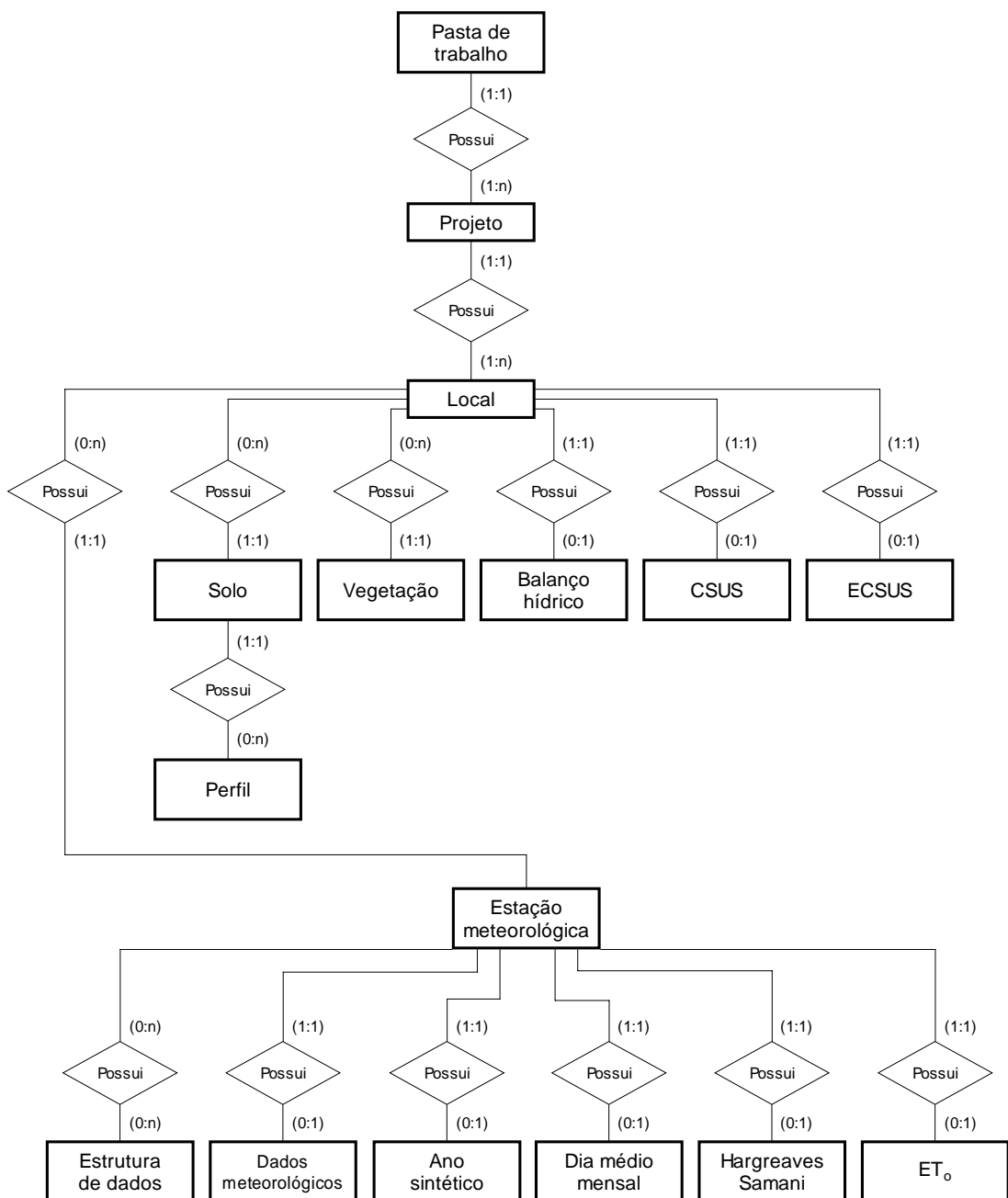


Figura 1A - Diagrama de entidades e relacionamentos.

Quadro 1A - Entidades do sistema e seus atributos. Os nomes das entidades estão em **negrito sublinhado**, as chaves primárias, em **vermelho**, e as estrangeiras, em **verde**

Projeto	Local	Estação	Solo	Vegetação	DE
CodProjeto Descricao Estado Regiao Obs	CodLocal CodProjeto (R) CodEstacao (R) CodSolo (R) SisClaSolo (R) CodPerfil (R) CodVegetacao (R) SisClaVegetacao (R) DesDadCalEto UDASCalEto DesDadCalBH UDASCalBH	CodEstacao Cidade Estado Latitude Longitude Altitude AltAnemometro DatInicial DatFinal	CodSolo SisClaSolo Sigla Classe(IInivel) Classe(IIInivel) Classe(IIIInivel) Classe(IVInivel)	CodVegetacao SisClaVegetacao Sigla Classe(IInivel) Classe(IIInivel) Classe(IIIInivel) Kv_Medio Kv_Janeiro Kv_Fevereiro Kv_Marco Kv_Abril Kv_Maio Kv_Junho Kv_Julho Kv_Agosto Kv_Setembro Kv_Outubro Kv_Novembro Kv_Dezembro	CodEstacao (R) Data Tx T Tn Ins Vv VvD Ur UrMin Pre
as	eto	hs	bh	ecsus	solperfil
CodEstacao (R) Dia Mes Tx NTx T NT Tn NTn Ins NTIns Vv NVv VvD NVvD Ur Nur UrMin NurMin Pre Npre	CodEstacao (R) Data Eto MetCalEto UDAS Pressao ResAerodinamica Lambda Gama GamLinha PreSatVapor PreVapor AngDecSol DisRelSol Ra Rs Rb Rn Ws N G Delta A B P F	CodEstacao (R) Mes Ano TemMaxMes TemMinMes TD	CodLocal (R) Data DesDados Eto KvUtil Etv Pre PreEfetiva EscSuperficial AguDisponivel UmiSolo AguPercolada Deficit UsoPreAnoSistetico	CodLocal (R) NumDiaUmido NumDiaUmedecendo NumDiaSeco NumDiaSecando NumEstUmido NumEstUmedecendo NumEstSeco NumEstSecando MedNumDiaUmido DesPadDurUmido MedNumDiaUmedecendo DesPadDurUmedecendo MedNumDiaSeco DesPadDurSeco MedNumDiaSecando DesPadDurSecando	CodSolo (R) SisClaSolo (R) CodPerfil CC PM Ds Dp VIB ConHidraulica LimSupAguDisponivel LimInfAguDisponivel SolUmido SolSeco AreGrossa AreFina Silte Argila ADA GraFloculacao PHH2O PHKCI CO MO Ca Mg K Na S H Al T V SatAl PCZ SiExtSulfurico FeExtSulfurico AlExtSulfurico TiExtSulfurico PExtSulfurico Ki Kr Al2O3/Fe2O3 MinPredominante %MinPredominante MinSecundario %MinSecundario
csus	ete	ree			
CodLocal (R) DatInicio DatFim Duracao CicEstado EstLogico	TipEstacao Medias Var1 . . . Var23	CodEstacao (R) TipEstacao (R) Medias (R)			

3. Dicionário de dados

Tabela	Tprojeto.db
Atributos:	<p>Campo: CodProjeto Descrição: Código do projeto. Domínio: Inteiro longo. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: Descricao Descrição: Descrição do projeto. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (25).</p> <p>Campo: Estado Descrição: Estado da federação brasileira. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (2).</p> <p>Campo: Regiao Descrição: Região brasileira. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (15).</p> <p>Campo: Obs Descrição: Observações sobre o projeto. Domínio: Memo.</p>
Chave primária:	CodProjeto
Tabela	Testacao.db
Atributos:	<p>Campo: CodEstacao Descrição: Código da estação meteorológica. Domínio: Inteiro longo. Tamanho máximo (7).</p> <p>Campo: Cidade Descrição: Nome da cidade brasileira associada à estação meteorológica. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (30).</p> <p>Campo: Estado Descrição: Sigla do estado da federação brasileira. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (2).</p> <p>Campo: Latitude Descrição: Latitude da estação meteorológica, em graus. Negativo para a região sul. Domínio: Número ($\pm 2,2$) . Tamanho máximo (6).</p> <p>Campo: Longitude Descrição: Longitude da estação meteorológica, em graus. Negativo para o oeste de G.W. Domínio: Número ($\pm 3,2$). Tamanho máximo (7).</p> <p>Campo: Altitude Descrição: Altitude da estação meteorológica, em m. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 5000,00]. Tamanho máximo (7).</p> <p>Campo: AltAnemometro Descrição: Altura em que se encontra instalado o anemômetro da estação meteorológica, em m. Domínio: Número (2,2), [2,00 .. 10,00] . Tamanho máximo (4).</p> <p>Campo: DatInicial Descrição: Data inicial do arquivo de dados diários da estação. Gerado automaticamente. Domínio: Data. Tamanho máximo (10).</p> <p>Campo: DatFinal Descrição: Data final do arquivo de dados diários da estação. Gerado automaticamente. Domínio: Data. Tamanho máximo (10).</p>
Chave primária:	CodEstacao

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tsolo.db
Atributos:	<p>Campo: CodSolo Descrição: Código das classes dos solos. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (11).</p> <p>Campo: SisClaSolo Descrição: Sistema de classificação de solo. Domínio: Alfanumérico, [Jacomine e Camargo (1955) SBCS]. Tamanho máximo (26).</p> <p>Campo: Sigla Descrição: Sigla referente à classe de solo. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: Classe(Inivel) Descrição: Classe do solo no primeiro nível categórico do sistema de classificação natural. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (20).</p> <p>Campo: Classe(linivel) Descrição: Classe do solo no segundo nível categórico do sistema de classificação natural. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (30).</p> <p>Campo: Classe(III nivel) Descrição: Classe do solo no terceiro nível categórico do sistema de classificação natural. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (40).</p> <p>Campo: Classe(IV nivel) Descrição: Classe do solo no quarto nível categórico do sistema de classificação natural. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (40).</p>
Chave primária:	CodSolo, SisClaSolo

Tabela	Tsolperfil.db
Atributos:	<p>Campo: CodSolo Descrição: Código do solo. Chave estrangeira da tabela TSolo.db. Através deste campo a tabela TSolo.db se relaciona com a tabela TSolPerfil.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (11).</p> <p>Campo: SisClaSolo Descrição: Sistema de classificação de solo. Chave estrangeira da tabela Tsolo.db. Através deste campo a tabela Tsolo.db se relaciona com a tabela Tsolperfil.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Alfanumérico, [Jacomine & Camargo (1955) SBCS]. Tamanho máximo (26)</p> <p>Campo: CodPerfil Descrição: Código do perfil do solo. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (11).</p> <p>Campo: CC Descrição: Capacidade de campo da camada considerada no perfil do solo, em % g/g. Domínio: Número (2,2), [1,00 .. 60,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: PM Descrição: Ponto de murchamento do perfil do solo, em % g/g. Domínio: Número (2,2), [1,00 .. 60,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: Ds Descrição: Densidade do solo, em g/cm³. Domínio: Número (1,2), [0,01 .. 2,00]. Tamanho máximo (4).</p>

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tsolperfil.db
	<p>Campo: Dp Descrição: Densidade de partículas, em g/cm³. Domínio: Número (1,2), [0,70 .. 4,00]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: VIB Descrição: Velocidade de infiltração básica, em mm/d. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 200,00]. Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: ConHidraulica Descrição: Condutividade hidráulica, em mm/d. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 200,00]. Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: LimSupAguDisponivel Descrição: Limite superior d'água disponível. Calculado a partir dos dados fornecidos pelo usuário no cálculo do balanço hídrico. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: LimInfAguDisponivel Descrição: Limite inferior d'água disponível. Calculado a partir dos dados fornecidos pelo usuário no cálculo do balanço hídrico. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: SolUmido Descrição: Umidade a partir da qual o solo será considerado úmido. Calculado a partir dos dados fornecidos pelo usuário no cálculo do balanço hídrico. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: SolSeco Descrição: Umidade a partir da qual o solo será considerado seco. Calculado a partir dos dados fornecidos pelo usuário no cálculo do balanço hídrico. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: AreGrossa Descrição: Areia grossa, em g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1.000,00]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: AreFina Descrição: Areia fina, em g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1.000,00]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: Silte Descrição: Silte, em g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1.000,00]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: Argila Descrição: Argila, em g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1.000,00]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: ADA Descrição: Argila dispersa em água, em g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1000,00]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: GraFoculacao Descrição: Grau de floculação, em g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1000,00]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: CO Descrição: Carbono orgânico, g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1000,00]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: MO Descrição: Matéria orgânica, g/kg. Domínio: Número (4,2), [0,00 .. 1000,00]. Tamanho máximo (7).</p>

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tsolperfil.db
	<p>Campo: PHH₂O Descrição: pH em H₂O. Domínio: Número (2,2), [2 .. 14]. Tamanho máximo (5).</p>
	<p>Campo: PHKCl Descrição: pH em KCl. Domínio: Número (2,2), [2 .. 14]. Tamanho máximo (5).</p>
	<p>Campo: P Descrição: mg/dm³ Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: K Descrição: Potássio, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: Al Descrição: Alumínio, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: Ca Descrição: Cálcio, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: Mg Descrição: Magnésio, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: Na Descrição: Sódio, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: H+Al Descrição: Hidrogênio, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: SB Descrição: Soma de bases, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: T Descrição: Capacidade de troca de cátions, mmol_e/dm³. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: V Descrição: Saturação de bases, %. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: SatAl Descrição: Saturação por alumínio, %. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: SiExtSulfurico Descrição: Silício, g/kg. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: AlExtSulfurico Descrição: Alumínio no extrato sulfúrico, g/kg. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: FeExtSulfurico Descrição: Ferro no extrato sulfúrico, g/kg. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tsolperfil.db
	<p>Campo: PExtSulfurico Descrição: Fósforo no extrato sulfúrico, g/kg. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: TiExtSulfurico Descrição: Titânio no extrato sulfúrico, g/kg. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: Ki Descrição: Ki, TFSA. Domínio: Número (1,2). Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kr Descrição: Kr, TFSA. Domínio: Número (1,2). Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Al₂O₃/Fe₂O₃ Descrição: Relação Al₂O₃/Fe₂O₃. Domínio: Número (2,2). Tamanho máximo (5).</p>
	<p>Campo: MinPredominante Descrição: Descrição do mineral predominante. Domínio: Alfanumérico (20).</p>
	<p>Campo: %MinPredominante Descrição: Percentual de mineral predominante, em %. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 100,00]. Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: MinSecundario Descrição: Descrição do mineral secundário. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (20).</p>
	<p>Campo: %MinSecundario Descrição: Percentual de mineral secundário, em %. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 100,00]. Tamanho máximo (5).</p>
	<p>Campo: PCZ Descrição: Ponto de carga zero. Domínio: Número (2,2), [2 .. 14]. Tamanho máximo (5).</p>
Chave primária:	CodSolo, SisClaSolo, CodPerfil
Chave estrangeira:	CodSolo, SisClaSolo

Tabela	Tvegetacao.db
Atributos:	<p>Campo: CodVegetacao Descrição: Código das classes da vegetação Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (11).</p>
	<p>Campo: SisClaVegetacao Descrição: Sistema de classificação da vegetação. Domínio: Alfanumérico, [EMBRAPA IBGE]. Tamanho máximo (7).</p>
	<p>Campo: Sigla Descrição: Sigla referente à classe de vegetação. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Classe(Inivel) Descrição: Classe da vegetação no primeiro nível categórico do sistema de classificação. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (35).</p>

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tvegetacao.db
	<p>Campo: Classe(IIInivel) Descrição: Classe da vegetação no segundo nível categórico do sistema de classificação. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (30).</p>
	<p>Campo: Classe(IIIInivel) Descrição: Classe da vegetação no terceiro nível categórico do sistema de classificação. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (30).</p>
	<p>Campo: Kv_Medio Descrição: Coeficiente de evapotranspiração médio da vegetação ao longo do ano. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Janeiro Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de janeiro. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Fevereiro Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de fevereiro. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Março Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de março. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Abril Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de abril. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Maio Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de maio. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Junho Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de junho. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Julho Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de julho. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Agosto Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de agosto. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Setembro Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de setembro. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Outubro Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de outubro. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Novembro Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de novembro. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
	<p>Campo: Kv_Dezembro Descrição: Coeficiente de evapotranspiração da vegetação no mês de dezembro. Domínio: Número (1,2), [0,00 .. 1,80]. Tamanho máximo (4).</p>
Chave primária:	CodVegetacao, SisClaVegetacao

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tlocal.db
Atributos:	<p>Campo: CodLocal Descrição: Código do local. Controlado pelo programa. Domínio: Inteiro longo.</p> <p>Campo: CodProjeto Descrição: Código do projeto. Chave estrangeira da tabela Tprojeto.db. Através deste campo a tabela Tprojeto.db se relaciona com a tabela Tlocal.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Inteiro longo. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: CodEstacao Descrição: Código da estação meteorológica. Chave estrangeira da tabela Testacao.db. Através deste campo a tabela Testacao.db se relaciona com a tabela Tlocal.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Inteiro longo. Tamanho máximo (7).</p> <p>Campo: CodSolo Descrição: Código de solo. Chave estrangeira da tabela Tsolo.db. Através deste campo a tabela Tsolo.db se relaciona com a tabela Tlocal.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (11).</p> <p>Campo: SisClaSolo Descrição: Sistema de classificação do solo. Chave estrangeira da tabela Tsolo.db. Através deste campo a tabela Tsolo.db se relaciona com a tabela Tlocal.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Alfanumérico, [Jacomine & Camargo (1955) SBCS] . Tamanho máximo (26)</p> <p>Campo: CodPerfil Descrição: Código do perfil do solo. Chave estrangeira da tabela Tsolperfil.db, através deste campo a tabela Tsolperfil.db se relaciona com a tabela Tlocal.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (11).</p> <p>Campo: CodVegetacao Descrição: Código da vegetação. Chave estrangeira da tabela Tvegetacao.db. Através deste campo a tabela Tvegetacao.db se relaciona com a tabela Tlocal.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (11).</p> <p>Campo: SisClaVegetacao Descrição: Sistema de classificação da vegetação. Chave estrangeira da tabela Tvegetacao.db. Através deste campo a tabela Tvegetacao.db se relaciona com a tabela Tlocal.db. Relacionamento 1:n. Domínio: Alfanumérico, [EMBRAPA IBGE]. Tamanho máximo (7).</p> <p>Campo: DesDadCalEto Descrição: Armazena a descontinuidade dos dados da estação meteorológica durante os cálculos da evapotranspiração de referência. Domínio: Memo.</p> <p>Campo: UDASCalEto Descrição: Utilização de dados do ano sintético durante os cálculos da evapotranspiração da estação meteorológica. Domínio: Memo.</p> <p>Campo: DesDadCalBH Descrição: Descontinuidade de dados da estação meteorológica durante os cálculos do balanço hídrico do local. Domínio: Memo.</p> <p>Campo: UDASCalBH Descrição: Utilização dos dados do ano sintético da estação meteorológica nos cálculos do balanço hídrico do local. Domínio: Memo.</p>
Chave primária:	CodLocal
Chaves estrangeiras:	CodProjeto, CodEstacao, CodSolo, SisClaSolo, CodPerfil, CodVegetacao, SisClaVegetacao

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela:	Tde.db (dados da estação)
Atributos:	Campo: CodEstacao Descrição: Código de estação meteorológica. Domínio: Inteiro longo (7).
	Campo: Data Descrição: Data. Domínio: Data. Tamanho máximo (10).
	Campo: Tx Descrição: Temperatura máxima diária, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: T Descrição: Temperatura média diária, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: Tn Descrição: Temperatura mínima diária, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: Ins Descrição: Insolação diária, em horas. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 18,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: Vv Descrição: Velocidade diária do vento, em m/s. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: VvD Descrição: Velocidade diurna diária do vento, em m/s. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: Ur Descrição: Umidade relativa diária do ar, em %. Domínio: Número (3,2), [00 .. 100,00]. Tamanho máximo (6).
	Campo: UrMin Descrição: Umidade relativa mínima diária do ar, em %. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 100,00]. Tamanho máximo (6).
	Campo: Pre Descrição: Precipitação acumulada diária, em mm. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 200,00]. Tamanho máximo (6).
	Chave primária: CodEstacao, Data
	Chave estrangeira: CodEstacao

Tabela	Ths.db (Hargreaves-Samani)
Atributos:	Campo: CodEstacao Descrição: Código da estação meteorológica. Chave estrangeira da tabela Testacao.db. Através deste campo a tabela Testacao.db se relaciona com a tabela Ths.db. Relacionamento 1:1. Domínio: Inteiro longo. Tamanho máximo (7).
	Campo: Mês Descrição: Mês. Domínio: "Short" (2), [1 .. 12]. Tamanho máximo (2).
	Campo: Ano Descrição: Ano. Chave primária. Domínio: "Short" (4). Tamanho máximo (4).

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Ths.db (Hargreaves-Samani)
	<p>Campo: TemMaxMes Descrição: Temperatura máxima do mês. Determinada pelos procedimentos de leitura de dados da estação. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: TemMinMes Descrição: Temperatura mínima do mês. Determinada pelos procedimentos de leitura de dados da estação. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: TD Descrição: Diferença entre a temperatura máxima e mínima do mês. Determinada pelos procedimentos de leitura de dados da estação. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p>
Chave primária:	CodEstacao, Mês, Ano

Tabela	Tas.db (ano sintético)
Atributos:	<p>Campo: CodEstacao Descrição: Código da estação meteorológica. Chave estrangeira da tabela Testacao.db. Através deste campo a tabela Testacao.db se relaciona com a tabela Tas.db. Relacionamento 1:1. Domínio: Inteiro longo (7).</p> <p>Campo: Dia Descrição: Dia. Domínio: "Short", [1..31]. Tamanho máximo (2).</p> <p>Campo: Mês Descrição: Mês. Domínio: "Short" (2), [1..12]. Tamanho máximo (2).</p> <p>Campo: Tx Descrição: Temperatura máxima média diária, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: NTx Descrição: Número de anos em que a temperatura máxima média diária existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4).</p> <p>Campo: T Descrição: Temperatura média diária, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: NT Descrição: Número de anos em que a temperatura média diária existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4).</p> <p>Campo: Tn Descrição: Temperatura mínima diária, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: NTn Descrição: Número de anos em que a temperatura mínima diária existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4).</p> <p>Campo: Ins Descrição: Insolação média diária, em horas. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 18,00]. Tamanho máximo (5).</p>

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tas.db (ano sintético)
	<p>Campo: NIns Descrição: Número de anos em que a insolação média diária existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4)</p>
	<p>Campo: Vv Descrição: Velocidade média diária do vento, em m/s. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p>
	<p>Campo: NVv Descrição: Número de anos em que a velocidade média diária do vento existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4)</p>
	<p>Campo: VvD Descrição: Velocidade diurna média diária do vento, em m/s. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p>
	<p>Campo: NVvD Descrição: Número de anos em que a velocidade diurna média diária do vento existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4)</p>
	<p>Campo: Ur Descrição: Umidade relativa média diária do ar, em %. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 100,00]. Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: NUr Descrição: Número de anos em que a umidade relativa média diária do ar existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4)</p>
	<p>Campo: UrMin Descrição: Umidade relativa mínima média diária do ar, em %. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 100,00]. Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: NUrMin Descrição: Número de anos em que a umidade relativa mínima média diária do ar existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4)</p>
	<p>Campo: Pre Descrição: Precipitação acumulada média diária, em mm. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 200,00]. Tamanho máximo (6).</p>
	<p>Campo: NPre Descrição: Número de anos em que a precipitação acumulada média diária existiu e foi íntegra. Domínio: "Short". Tamanho máximo (4)</p>
Chave primária:	CodEstacao, Dia, Mês
Chave estrangeira:	CodEstacao

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tdmm.db (dia médio mensal)
Atributos:	<p>Campo: CodEstacao Descrição: Código de estação meteorológica. Domínio: Inteiro longo. Tamanho máximo (7).</p> <p>Campo: Mês Descrição: Mês do ano. Domínio: "Short". Tamanho máximo (2).</p> <p>Campo: Tx Descrição: Temperatura máxima. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: T Descrição: Temperatura média. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: Tn Descrição: Temperatura mínima. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em °C. Domínio: Número (2,2), [-20,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: Ins Descrição: Insolação. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica ao longo, dos anos da série, em horas. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 18,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: Vv Descrição: Velocidade do vento. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em m/s. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: VvD Descrição: Velocidade diurna. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em m/s. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 50,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: Ur Descrição: Umidade relativa. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em %. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 100,00]. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: UrMin Descrição: Umidade relativa mínima. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em m/s. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 100,00]. Tamanho máximo (6).</p> <p>Campo: Pre Descrição: Precipitação. Representa o dia médio mensal da estação meteorológica, ao longo dos anos da série, em m/s. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 200,00]. Tamanho máximo (6).</p>
Chave primária:	CodEstacao, Dia, Mês

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Teto.db (evapotranspiração de referência)
Atributos:	<p>Campo: CodEstacao Descrição: Código de estação. Chave estrangeira da tabela Testacao.db. Através deste campo a tabela Testacao.db se relaciona com a tabela Teto.db. Relacionamento 1:1. Domínio: Inteiro longo. Tamanho máximo (7).</p> <p>Campo: Data Descrição: Data. Domínio: Data. Tamanho máximo (10).</p> <p>Campo: Eto Descrição: Evaporação potencial de referência para a vegetação de referência, em mm/dia¹. Calculado pelos métodos disponíveis (ver MetCalEto). Domínio: Número. Tamanho máximo (5).</p> <p>Campo: MetCalEto Descrição: Descreve o método utilizado para cálculo de Eto do dia. Obedece a seguinte hierarquia: 1 - Método de Penman-Monteith; 2 - Método de Hargreaves-Samani; 3 - Método de Blaney-Criddle-FAO. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (17).</p> <p>Campo: UDAS Descrição: Utilização de dados do ano sintético no cálculo da ETo do dia. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (3).</p> <p>Campo: Pressao Descrição: Pressão diária do ar. Calculado pela equação 9. Domínio: Número.</p> <p>Campo: ResAerodinamica Descrição: Resistência aerodinâmica da cultura. Calculado pela equação 6. Domínio: Número.</p> <p>Campo: Lambda Descrição: Calor latente de evaporação. Calculado pela equação 7. Domínio: Número.</p> <p>Campo: Gama Descrição: Constante psicrométrica. Calculado pela equação 8. Domínio: Numérico.</p> <p>Campo: GamLinha Descrição: Constante psicrométrica modificada. Calculado pela equação 4. Domínio: Número.</p> <p>Campo: PreSatVapor Descrição: Pressão de saturação de vapor d'água, em kPa. Calculado pela equação 10. Domínio: Número</p> <p>Campo: PreVapor Descrição: Pressão de vapor d'água, em kPa. Calculado pela equação 12. Domínio: Número.</p> <p>Campo: AngDecSol Descrição: Ângulo de declinação solar, em radianos. Calculado pela equação 16. Domínio: Número.</p> <p>Campo: DisRelSol Descrição: Distância relativa da terra ao sol, adimensional. Calculado pela equação 17. Domínio: Número.</p>

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Teto.db (evapotranspiração de referência)
	<p>Campo: Ra Descrição: Radiação solar no topo da atmosfera, em MJ m⁻² d⁻¹. Calculado pela equação 15. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: Rs Descrição: Radiação solar na superfície, em MJ m⁻² d⁻¹. Calculado pela equação 14. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: Rb Descrição: Radiação solar de ondas longas, em MJ m⁻² d⁻¹. Calculado pela equação 20. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: Rn Descrição: Saldo de radiação, em MJ m⁻² d⁻¹. Calculado pela equação 13. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: Ws Descrição: Ângulo na hora do pôr-do-sol, em radianos. Calculado pela equação 18. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: N Descrição: Máximo de horas de insolação diária possível, em horas. Calculado pela equação 19. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: G Descrição: Valor médio do fluxo de calor no solo (em geral desprezado), em MJ m⁻² d⁻¹, em geral desprezado. Calculado pela equação 21. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: Delta Descrição: Declividade da curva de pressão de vapor na saturação, kPa °C⁻¹. Calculado pela equação 11. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: A Descrição: Coeficiente da equação de Blaney-Criddle, em mm/dia¹. Calculado pela equação 23. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: B Descrição: Coeficiente da equação de Blaney-Criddle, adimensional. Calculado pela equação 24. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: P Descrição: Percentagem diária média anual de horas de brilho solar, em %. Calculado pela equação 25. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: F Descrição: Coeficiente da equação de Blaney-Criddle, em mm/dia¹. Calculado pela equação 22. Domínio: Número.</p>
Chave primária:	CodEstacao, Data
Chave estrangeira:	CodEstacao

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tbh.db (balanço hídrico)
Atributos:	
	Campo: CodLocal Descrição: Código de local, chave estrangeira da tabela Tlocal.db. Através deste campo a tabela Tlocal.db se relaciona com a tabela Tbh.db. Relacionamento 1:1. Domínio: Inteiro longo.
	Campo: Data Descrição: Data. Domínio: Data. Tamanho máximo (10).
	Campo: DesDados. Descrição: Descontinuidade de dados da estação meteorológica. Determinado no procedimento de cálculos do balanço hídrico. Domínio: Alfanumérico. Tamanho máximo (3).
	Campo: Eto Descrição: Evaporação potencial para a vegetação de referência, em mm/dia ¹ . Calculado no procedimento de cálculo da Eto. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 14,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: Etv Descrição: Evaporação da vegetação, em mm/dia ¹ . Calculado no procedimento cálculos diários de Eto e do balanço hídrico. Domínio: Número (2,2), [0,00 .. 14,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: UmiSolo Descrição: Umidade do solo, em mm. Domínio: Número (3,2), [0,00 .. 200,00]. Tamanho máximo (5).
	Campo: PreEfetiva Descrição: Precipitação efetiva, em mm/dia ¹ . Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).
	Campo: Pre Descrição: Precipitação, em mm/dia ¹ . Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).
	Campo: EscSuperficial Descrição: Escoamento superficial, em mm. Domínio: Número (3,2). Tamanho máximo (6).
	Campo: AguDisponivel Descrição: Água disponível, em mm. Domínio: Número.
	Campo: AguPercolada Descrição: Água percolada, em mm. Domínio: Número.
	Campo: Deficit Descrição: Déficit hídrico, em mm. Domínio: Número.
	Campo: UsoPreAnoSintetico Descrição: Utilização da precipitação do ano sintético. Domínio: Alfanumérico (3). Definido durante o cálculo do balanço hídrico.
	Campo: LimSupAguDisponivel Descrição: Limite superior d'água disponível, em mm. Domínio: Número.
	Campo: LimInfAguDisponivel Descrição: Limite inferior d'água disponível. Domínio: Número.

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tbh.db (balanço hídrico)
	<p>Campo: SolUmido Descrição: Umidade limite, acima da qual o solo será considerado úmido. Domínio: Número.</p> <p>Campo: SolSeco Descrição: Umidade limite, abaixo da qual o solo será considerado seco. Domínio: Número.</p> <p>Chave primária: CodLocal, Data</p> <p>Chave estrangeira: CodLocal</p>
Tabela	Tcsus.db (ciclos sucessivos de umedecimento e secagem)
Atributos:	<p>Campo: CodLocal Descrição: Código de local, chave estrangeira da tabela Tlocal.db. Através deste campo a tabela Tlocal.db se relaciona com a tabela Tcsus.db. Relacionamento 1:1. Domínio: Inteiro longo.</p> <p>Campo: DatInicio Descrição: Data do início do ciclo/estado da umidade do solo. Domínio: Data.</p> <p>Campo: DatFim Descrição: Data do fim do ciclo/estado da umidade do solo. Domínio: Data.</p> <p>Campo: Duracao Descrição: Duração do fim do ciclo/estado da umidade do solo, em dias. Domínio: Inteiro longo.</p> <p>Campo: CicEstado Descrição: Descrição do ciclo/estado da umidade do solo. Domínio: Alfanumérico (18).</p> <p>Campo: EstLogico Descrição: Estado lógico do ciclo/estado da umidade do solo. Domínio: "Short".</p> <p>Chave primária: CodLocal, DatInicio, DatFim</p> <p>Chave estrangeira: CodLocal</p>
Tabela	Tecsus.db (estatísticas dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem)
Atributos:	<p>Campo: CodLocal Descrição: Código de local, chave estrangeira da tabela Tlocal.db. Através deste campo a tabela Tlocal.db se relaciona com a tabela Tecsus.db. Relacionamento 1:1. Domínio: Inteiro longo.</p> <p>Campo: NumDiaUmido Descrição: Número de dias no estado lógico úmido. Domínio: "Short".</p> <p>Campo: NumDiaUmedecendo Descrição: Número de dias no estado lógico umedecendo. Domínio: "Short".</p> <p>Campo: NumDiaSeco Descrição: Número de dias no estado lógico seco. Domínio: "Short".</p>

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tecsus.db (estatísticas dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem)
	<p>Campo: NumDiaSecando Descrição: Número de dias no estado lógico secando. Domínio: "Short".</p>
	<p>Campo: NumEstUmido Descrição: Número de vezes em que o solo esteve no estado lógico úmido. Domínio: "Short".</p>
	<p>Campo: NumEstUmedecendo Descrição: Número de vezes em que o solo esteve no estado lógico umedecendo. Domínio: "Short".</p>
	<p>Campo: NumEstSeco Descrição: Número de vezes em que o solo esteve no estado lógico seco. Domínio: "Short".</p>
	<p>Campo: NumEstSecando Descrição: Número de vezes em que o solo esteve no estado lógico secando. Domínio: "Short".</p>
	<p>Campo: MedNumDiaUmido Descrição: Duração média do estado lógico úmido. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: DesPadDurUmido Descrição: Desvio-padrão da duração média do estado lógico úmido. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: MedNumDiaUmedecendo Descrição: Duração média do estado lógico umedecendo. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: DesPadDurUmedecendo Descrição: Desvio-padrão da duração média do estado lógico umedecendo. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: MedNumDiaSeco Descrição: Duração média do estado lógico seco. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: DesPadDurSeco Descrição: Desvio-padrão da duração média do estado lógico seco. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: MedNumDiaSecando Descrição: Duração média do estado lógico secando. Domínio: Número.</p>
	<p>Campo: DesPadDurSecando Descrição: Desvio-padrão da duração média do estado lógico secando. Domínio: Número.</p>
Chave primária:	CodLocal
Chave estrangeira:	CodLocal

Continua...

Dicionário de dados, Cont.

Tabela	Tete.db (estrutura de dados da estação)
Atributos:	<p>Campo: TipEstacao Descrição: Tipo de estrutura de dados. Em geral, utiliza-se o nome do órgão fornecedor dos dados meteorológicos. Exemplos: INMET, IAPAR. Domínio: Alfanumérico (10).</p> <p>Campo: Medias Descrição: Armazena a informação se os dados do órgão fornecedor são três leituras diárias ou se as médias diárias já processadas. Domínio: "Short".</p> <p>Campo: Var1 Descrição: Armazena a variável da primeira coluna do arquivo-texto da estação meteorológica. Domínio: Alfanumérico (5).</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>Campo: Var23 Descrição: Armazena a variável da vigésima terceira da coluna do arquivo-texto da estação meteorológica. Domínio: Alfanumérico (5).</p>
Chaves primárias:	TipEstacao, Medias
Tabela	Tree.db (relacional: estação-estrutura de dados da estação)
Atributos:	<p>Campo: CodEstacao Descrição: Código da estação, chave estrangeira da tabela Testacao.db. Domínio: Inteiro longo.</p> <p>Campo: TipEstacao Descrição: Tipo de estrutura de dados da estação, chave estrangeira da tabela Tete.db. Domínio: Data.</p> <p>Campo: Medias Descrição: Código de local, chave estrangeira da tabela Tete.db. Domínio: Data.</p>
Chaves estrangeiras:	CodEstacao, TipEstacao, Medias

3.1. Significado dos domínios do banco de dados Paradox 7

Para o banco de dados Paradox, os domínios, ou a natureza, da declaração do tipo de dados, de cada campo das tabelas do banco de dados, possuem os seguintes significados:

- a) Alfanuméricos: podem conter seqüências de caracteres constituídos de letras, números, símbolos como %, &, #, or = e outros caracteres ASCII.
- b) Numéricos: podem conter apenas números. A amplitude do conteúdo destes campos pode variar de aproximadamente 10^{-307} a 10^{308} ; são representados por 15 dígitos significativos. Este campo foi utilizado para todos os campos em que foram efetuadas operações matemáticas, simples ou complexas, na modelagem numérica.
- c) Data: podem conter apenas datas válidas de 1º de janeiro de 9999 a.C. a 31 de dezembro de 9999 d.C.
- d) Inteiro longo: podem conter apenas números inteiros, apresentando precisão na amplitude de -2.147.483.648 a 2.147.483.647.
- e) Memo: podem possuir qualquer tamanho. Os conteúdos dos campos memo superiores a 240 caracteres, limite de caracteres para o armazenamento interno nas tabelas, são armazenados fora das tabelas, em arquivos com a extensão .MB, gerenciados automaticamente pelo banco de dados.
- f) Booleano: são campos lógicos que podem conter apenas “yes” ou “no”.

4. Dicionário das equações do sistema

Equação	Descrição em unidades S.I., exceto equações 3 e 22 a 25
1	Penman-Monteith, evaporação potencial referência grama $ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} (1710 - 6,85T) \frac{1}{r_a} (e^o - e), \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ <p>T = temperatura média do ar, °C; e u₂ = velocidade do vento a 2,0 m de altura, m.s⁻¹.</p>
2	Blaney-Criddle $ET_o = a + b \times f$
3	Hargreaves-Samani $ET_o = 0,0023 R_a T D^{0,5} (T + 17,8)$ <p>TD = diferença das temperaturas médias máxima e mínima do mês, °C; e T = temperatura média do ar, °C.</p>
4	Constante psicrométrica modificada $\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right), \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
5	Resistência da cultura à transferência de vapor $r_c = 69, \text{ s.m}^{-1}$
6	Resistência aerodinâmica $r_a = \frac{208}{u_2}, \text{ s.m}^{-1}$
7	Lambda $\lambda = 2,501 - 2,3601 \times 10^{-3} T, \text{ em MJ kg}^{-1}$ <p>T em °C</p>
8	Constante psicrométrica $\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda}, \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
9	Pressão atmosférica $P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{3,256}, \text{ kPa}$
10	Pressão de vapor na saturação, em que T é em °C. $e^o = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right), \text{ kPa}$
11	Declividade da curva de pressão de vapor na saturação $\Delta = \frac{4098e^o}{(T + 237,3)^2}, \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$

Continua...

Dicionário das equações do sistema, Cont.

Equação	Descrição em unidades S.I., exceto equações 3 e 22 a 25
12	<p>Pressão de Vapor</p> $e = \frac{UR \times e^0}{100}, \text{ kPa}$ <p>UR em %</p>
13	<p>Saldo de Radiação</p> $R_n = (1 - \alpha)R_s + R_b, \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ <p>$\alpha = 0,23$, albedo para uma superfície coberta completamente com vegetação em crescimento ativo</p>
14	<p>Radiação solar na superfície</p> $R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a, \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ <p>n/N = Relação entre as horas de insolação medida e a o máximo de horas de insolação diária possível a e b = Coeficientes de Ångstron, $a = 0,25$ e $b = 0,50$</p>
15	<p>Radiação solar diária no topo da atmosfera</p> $R_a = \left(\frac{1440}{\pi} \right) G_{sc} \times d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s), \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ <p>ϕ = latitude em radianos (negativa para latitudes sul) δ = declinação solar, em radianos ω_s = ângulo do ocaso do sol, em radianos d_r = distância relativa da terra ao sol $G_{sc} = 0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, constante solar</p>
16	<p>Declinação solar</p> $\delta = 0,4102 \sin \left(\frac{2\pi(284 + J)}{365} \right), \text{ radianos}$ <p>J = dia do ano ($1/1 = 1$)</p>
17	<p>Distância relativa da terra ao sol</p> $D_r = 1 + 0,034 \cos \left(\frac{2\pi J}{365,25} \right), \text{ adimensional}$
18	<p>Ângulo na hora do pôr-do-sol</p> $\omega_s = \arccos(-\tan \phi \times \tan \delta), \text{ radianos}$
19	<p>Máximo de horas de insolação diária possíveis</p> $N = \omega_s \left(\frac{24}{\pi} \right), \text{ hora}$
20	<p>Saldo de radiação de ondas longas à superfície</p> $R_b = - \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) 4,903 \times 10^{-9} \left(\frac{T_x^4 + T_n^4}{2} \right), \text{ MJm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ <p>T_x = temperatura máxima diária, K T_n = temperatura mínima diária, K N = horas de insolação diária e_a = pressão de vapor na saturação, em que T é em °C</p>

Continua...

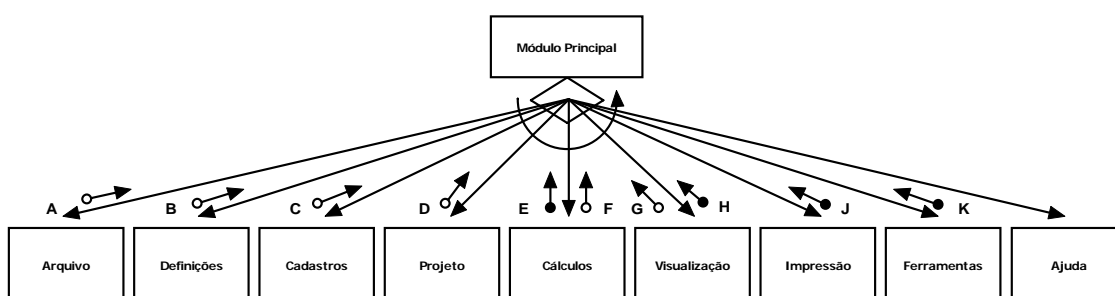
Dicionário das equações do sistema, Cont.

Equação	Descrição em unidades S.I., exceto equações 3 e 22 a 25
21	<p>Valor médio do fluxo de calor no solo (em geral desprezado)</p> $G = 3,8(T_i - T_{i-1}), \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ <p>T_i = temperatura média do ar, °C, para o dia i T_{i-1} = temperatura média do ar, °C, para o dia $(i - 1)$</p>
22	<p>Coefficiente da equação de Blaney-Criddle</p> $f = p(0,46T + 8,13)$ <p>p = percentagem diária média anual de horas de brilho solar.</p>
23	<p>Coefficiente da equação de Blaney-Criddle</p> $a = 0,0043 \text{ RH}_{\min} - \frac{n}{m} - 1,41$ <p>RH_{\min} = umidade relativa mínima diária, em %.</p>
24	<p>Coefficiente da equação de Blaney-Criddle</p> $b = a_0 + a_1 \text{RH}_{\min} + a_2 \frac{n}{N} + a_3 U_d + a_4 \text{RH}_{\min} \frac{n}{m} + a_5 \text{RH}_{\min} U_d$ <p>$a_0 = 0,82$ $a_1 = -0,41 \times 10^{-2}$ $a_2 = 1,07$ $a_3 = 0,066$ $a_4 = -0,60 \times 10^{-2}$ $a_5 = -0,60 \times 10^{-3}$ U_d = velocidade do vento do período diurno a 2 m de altura, m s^{-1}.</p>
25	<p>Percentagem diária média anual de horas de brilho solar</p> $p = \frac{\sum_{j=1}^{365} h_j}{365} (100 \text{ \%})$ <p>h_j = número de horas de insolação no dia J h_i = número de horas de insolação no dia i n = insolação diária, em horas</p> $h_i = \omega_s \left(\frac{24}{\pi} \right)$
26	<p>Capacidade total de armazenamento de água</p> $\text{CTA} = (\text{Cc} - \text{Pm}) \cdot \text{Ds} \cdot z \cdot 10$ <p>CTA = capacidade total de armazenamento d'água do solo, mm Cc = capacidade de campo, g g^{-1} Pm = ponto de murcha, g g^{-1} Ds = densidade do solo, g cm^{-3} z = profundidade do solo considerada no balanço hídrico, cm</p>
27	<p>Evapotranspiração potencial da vegetação</p> $\text{ETpv} = K_v \cdot \text{ETo}$ <p>ETpv = evapotranspiração potencial da vegetação, mm K_v = coeficiente de evapotranspiração da vegetação Eto = evapotranspiração de referência, mm</p>
28	<p>Evapotranspiração real da vegetação</p> $\text{ETrv} = \text{ETpv} \cdot \frac{\text{AD}}{\text{CTA}}$ <p>ETrv = evapotranspiração real da vegetação, mm ETpv = evapotranspiração potencial da vegetação, mm AD = água disponível, mm CTA = capacidade total de armazenamento d'água do solo, mm</p>

APÊNDICE B

Estrutura do programa orientado a objetos

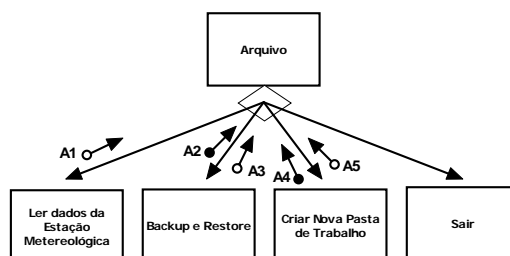
B.1. Diagrama de fluxo de dados de nível 1 para sistema de interface com o usuário: menu principal



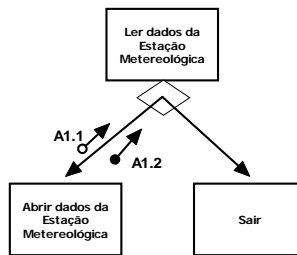
Legenda do módulo principal:

- A** - Dados da estação ou “backup/restore”
- B** - Dados de opções definidas
- C** - Dados de cadastros
- D** - Dados de um projeto ou atualizações
- E** - “Status” pós-cálculo
- F** - Resultado de cálculos
- G** - Controle para aplicação de foco
- H** - Controle para aplicação de foco
- J** - Controle para aplicação de foco
- K** - Controle para módulos internos – retorna o “status” após uma ação

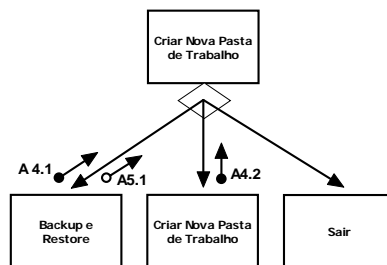
B.2. Diagrama de fluxo de dados de nível 2 para sistema de interface com o usuário: arquivo



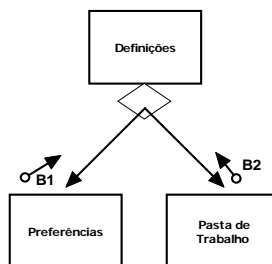
B.3. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo arquivo: ler dados da estação meteorológica



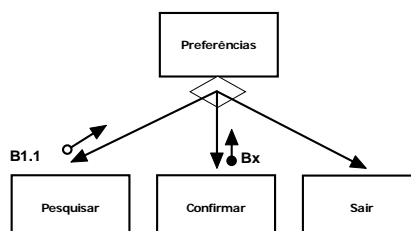
B.4. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo arquivo: criar pasta de trabalho



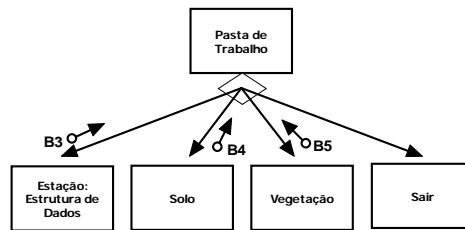
B.5. Diagrama de fluxo de dados de nível 2: módulo principal → definições



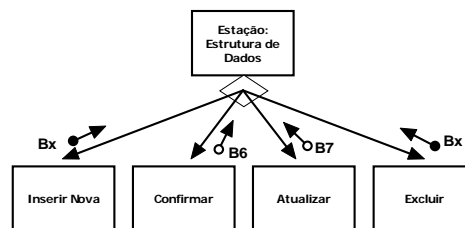
B.6. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo definições → preferências



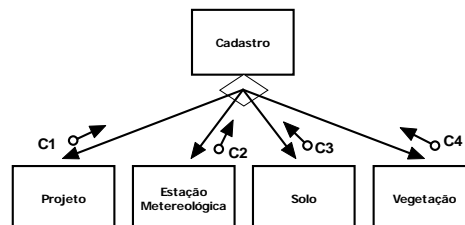
B.7. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo definições → pasta de trabalho



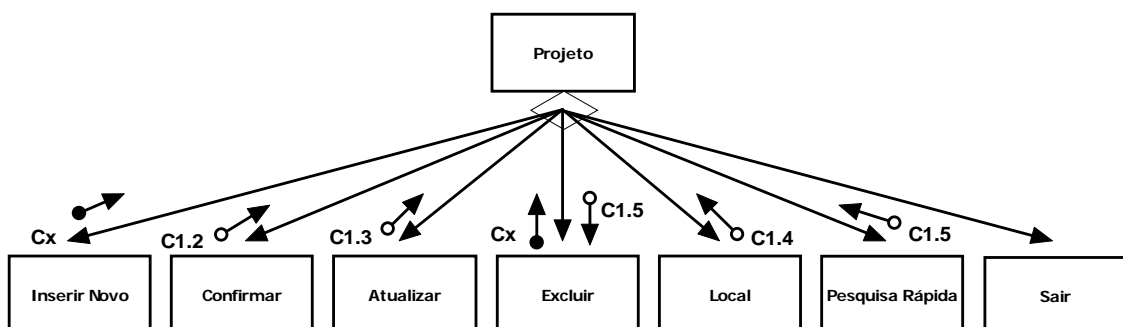
B.8. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo pasta de trabalho: estação → estrutura de dados



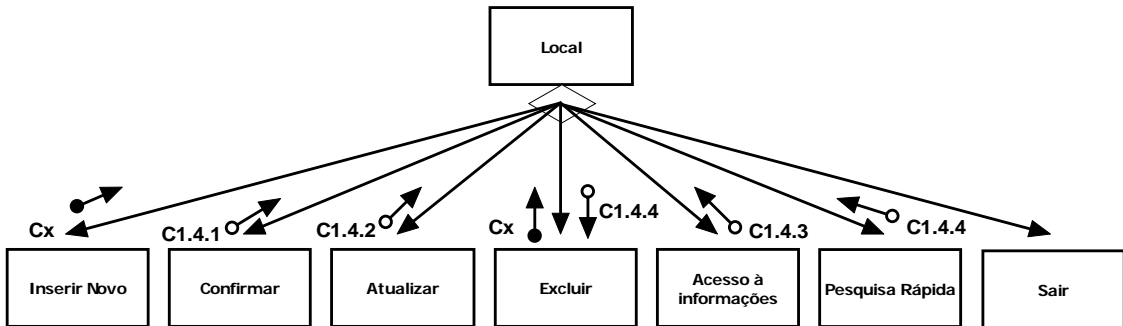
B.9. Diagrama de fluxo de dados de nível 2: módulo principal → cadastro



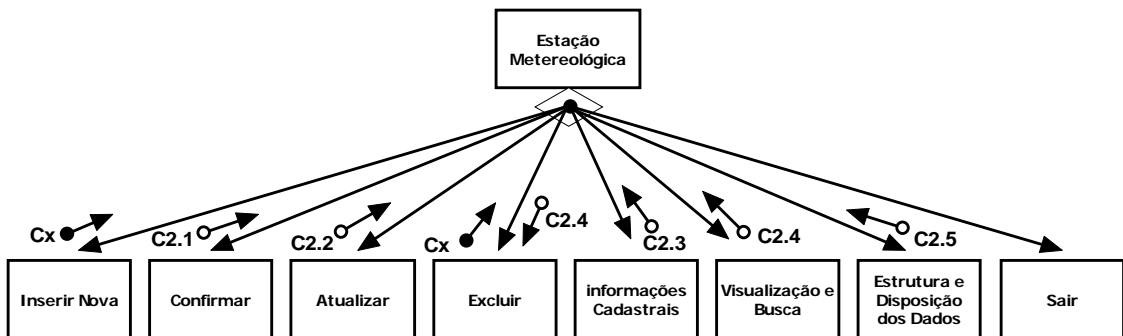
B.10. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cadastro → projeto



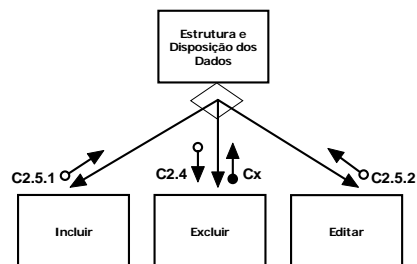
B.11. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo projeto → local



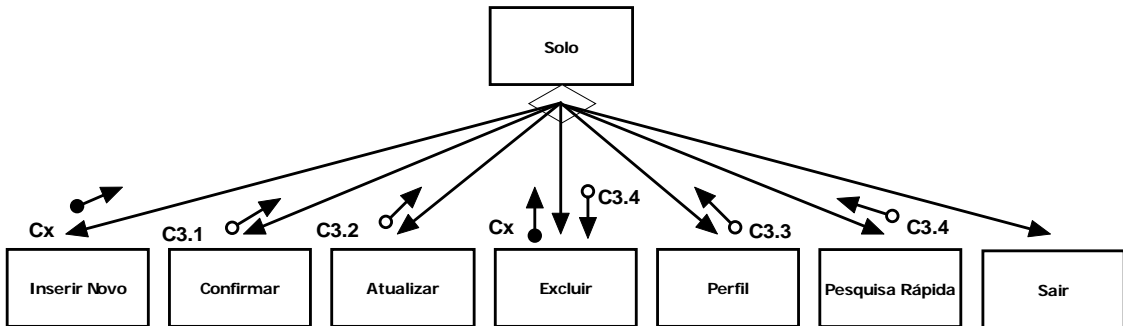
B.12. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cadastro → estação meteorológica



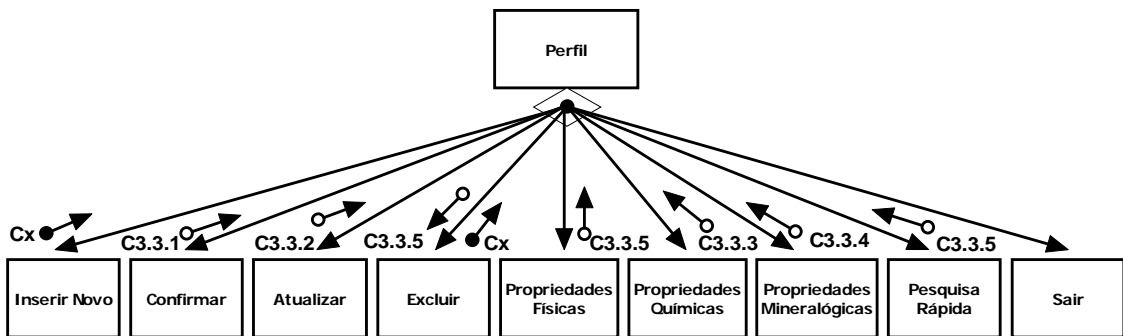
B.13. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo estação meteorológica → estrutura e disposição dos dados



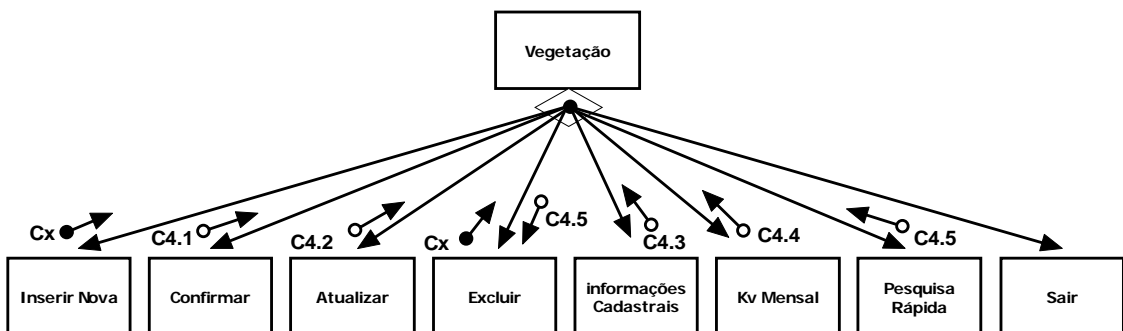
B.14. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cadastro → solo



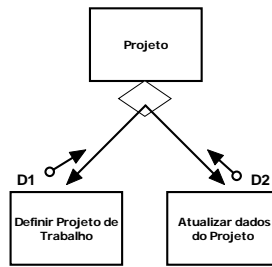
B.15. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo solo → perfil



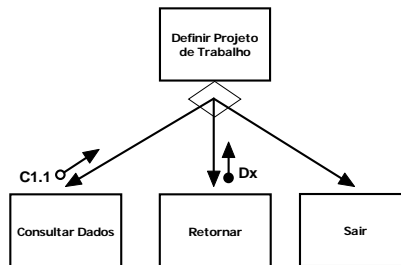
B.16. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cadastro → vegetação



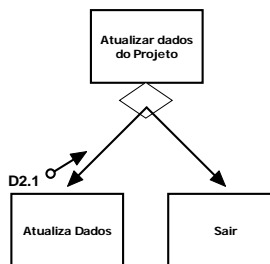
B.17. Diagrama de fluxo de dados de nível 2: módulo principal → projeto



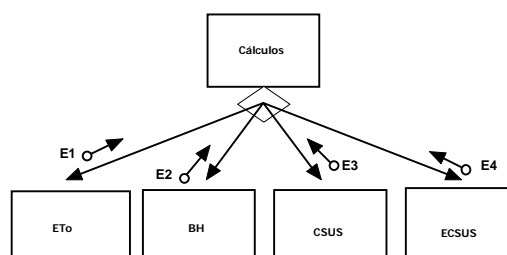
B.18. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo projeto → definir projeto de trabalho



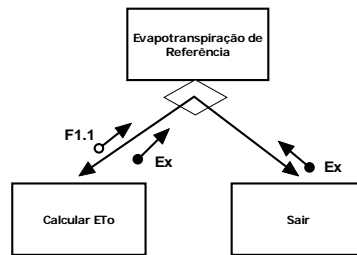
B.19. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo projeto → atualizar dados do projeto de trabalho



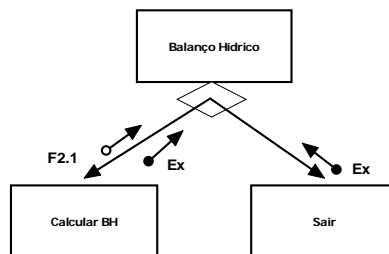
B.20. Diagrama de fluxo de dados de nível 2: módulo principal → cálculos



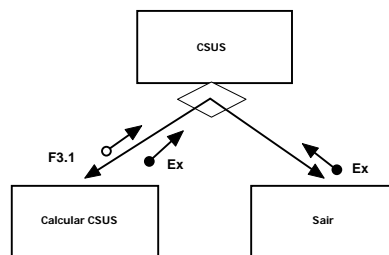
B.21. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cálculos → evapotranspiração de referência



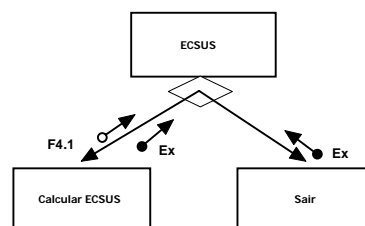
B.22. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cálculos → balanço hídrico



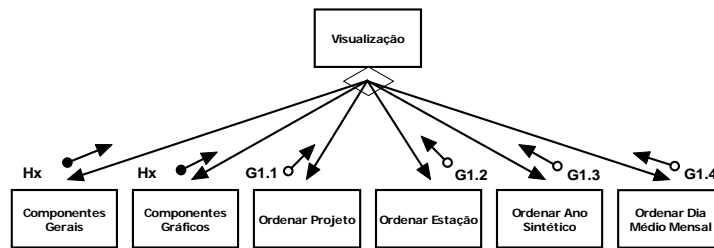
B.23. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cálculos → ciclos sucessivos de umedecimento e secagem



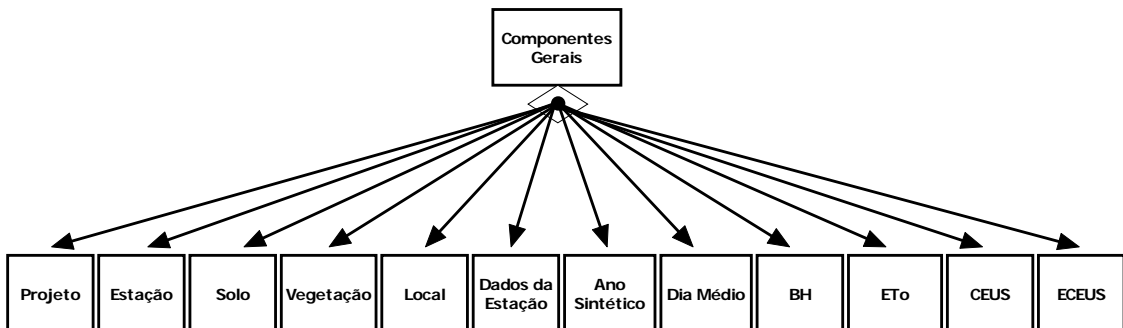
B.24. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo cálculos → estatísticas dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem



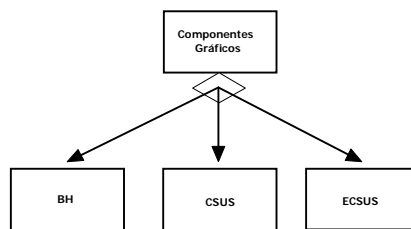
B.25. Diagrama de fluxo de dados de nível 2: módulo principal: visualização



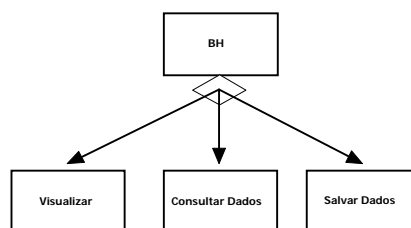
B.26. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo visualização → componentes gerais



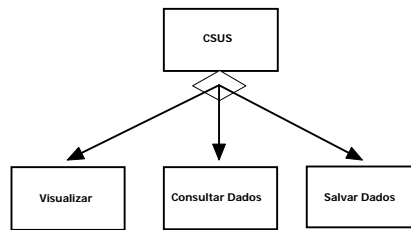
B.27. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo visualização → componentes gráficos



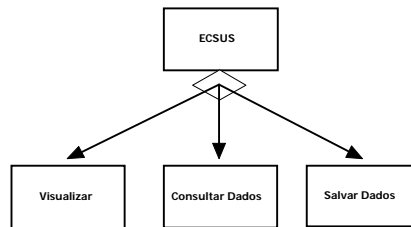
B.28. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo componentes gráficos → balanço hídrico



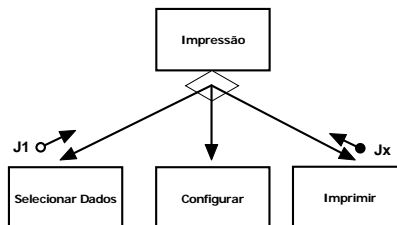
B.29. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo componentes gráficos
 → ciclos sucessivos de umedecimento e secagem



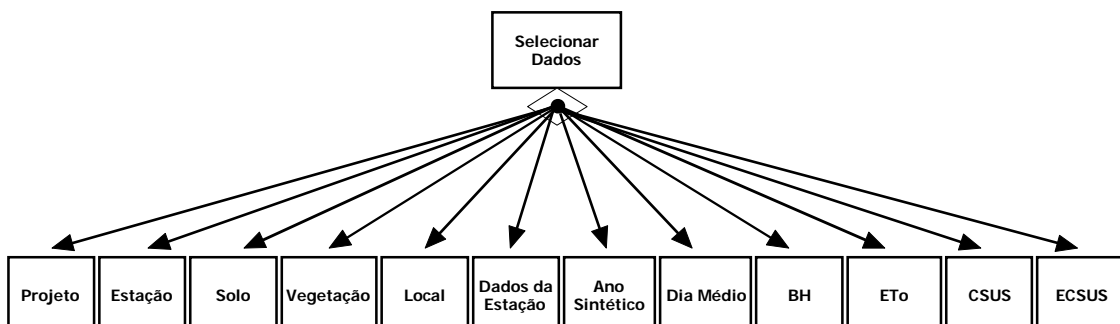
B.30. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo componentes gráficos
 → estatísticas dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem



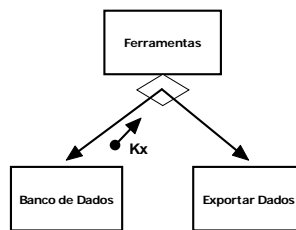
B.31. Diagrama de fluxo de dados de nível 2: módulo principal → impressão



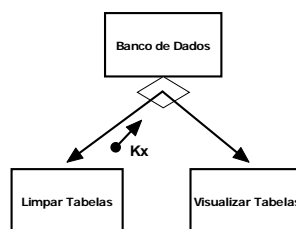
B.32. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo impressão → selecionar dados



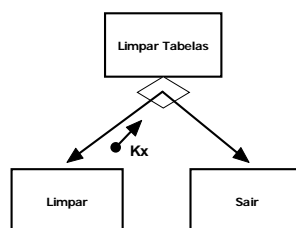
B.33. Diagrama de fluxo de dados de nível 2: módulo principal → ferramentas



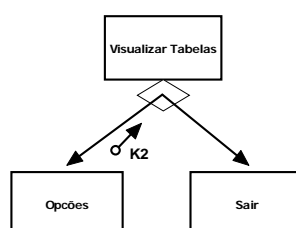
B.34. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo ferramentas → banco de dados



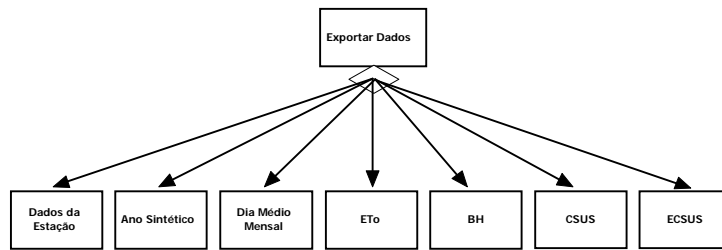
B.35. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo banco de dados → limpar tabelas



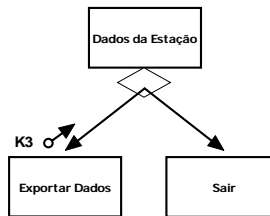
B.36. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo banco de dados → visualizar tabelas



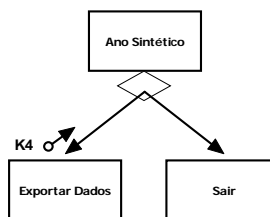
B.37. Diagrama de fluxo de dados de nível 3: módulo ferramentas → exportar dados



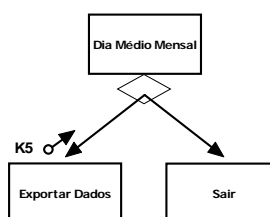
B.38. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo exportar dados → dados da estação



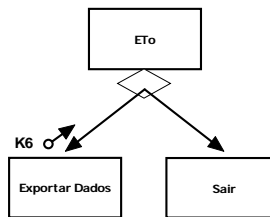
B.39. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo exportar dados → ano sintético



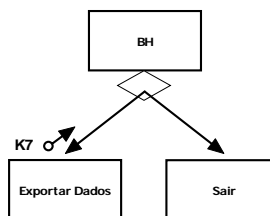
B.40. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo exportar dados → dia médio mensal



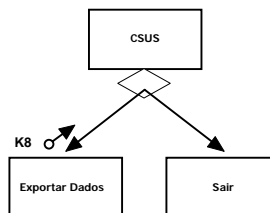
B.41. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo exportar dados → ETo



B.42. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo exportar dados → balanço hídrico



B.43. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo exportar dados → ciclos sucessivos de umedecimento e secagem



B.44. Diagrama de fluxo de dados de nível 4: módulo exportar dados → estatísticas dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem

