

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E**  
**URBANISMO**

**Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e  
Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN**

**ADERSON SARTORI**

**Campinas, SP**  
**2010**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E**  
**URBANISMO**

**Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e**  
**Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN**

**ADERSON SARTORI**

Tese apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

**Orientador: Prof. Dr. ABEL MAIA GENOVEZ**

**Campinas, SP**  
**2010**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sa77d Sartori, Aderson  
Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN / Aderson Sartori. -- Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Abel Maia Genovez.  
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Hidrologia. 2. Ciência do solo. 3. Calibração. 4. Escoamento. I. Genovez, Abel Maia. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Development of criteria for hydrologic soil classification and determination of reference CN values

Palavras-chave em Inglês: Hydrology, Soil science, Calibration, Runoff

Área de concentração: Recursos Hídricos

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Gilberto Dalfré Filho, Ricardo Marques Coelho, Luiz Roberto Moretti, José Teixeira Filho

Data da defesa: 02/07/2010

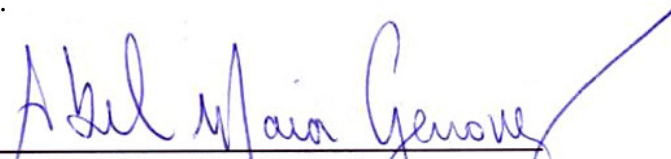
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

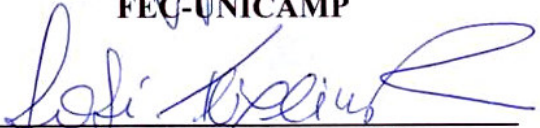
**Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e  
Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN**

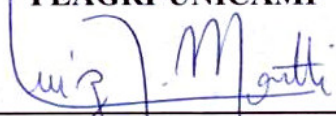
**ADERSON SARTORI**

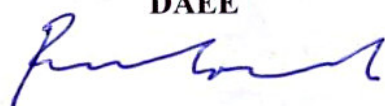
Tese apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos, aprovada pela Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Abel Maia Genovez**  
**Presidente e Orientador/FEC-UNICAMP**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho**  
**FEC-UNICAMP**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Teixeira Filho**  
**FEAGRI-UNICAMP**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Luiz Roberto Moretti**  
**DAEE**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ricardo Marques Coelho**  
**IAC**

**Campinas, 2 de julho de 2010.**



Aos meus pais, João Elias e Ana Maria, pelo  
exemplo de determinação,  
a minha irmã, pelo apoio,  
e a todos os interessados no assunto,  
Dedico.





## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida com saúde.

Ao Dr. Abel Maia Genovez, pela amizade, orientação, apoio e paciência, principalmente nos momentos difíceis.

Ao Dr. Francisco Lombardi Neto, pela amizade, apoio e colaboração.

Ao Dr. Richard H. Hawkins, pela amizade, pela ajuda incondicional com as dificuldades encontradas enquanto estive em Tucson, AZ, EUA, e pela presteza em esclarecer minhas dúvidas sempre que solicitei.

A “School of Natural Resources” da “The University of Arizona” que me concedeu o direito de ser seu aluno visitante sob orientação do Prof. Dr. Richard H. Hawkins.

Aos funcionários da “The University of Arizona” pela ajuda com os “paperworks”.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas, a Aracruz Celulose e Papel, a Universidade Federal da Paraíba, campus de Campina Grande, a Universidade Estadual de Santa Catarina e ao Dr. Walter de Paula Lima (ESALQ) pelos dados hidrológicos fornecidos.

A CAPES pela bolsa de estudos.

Aos amigos David Delgado, Rolf e Rafael Rosolem, pela amizade, auxílio e convivência agradável enquanto estive em Tucson, Arizona.

Aos colegas e amigos da Unicamp pela amizade e auxílio no dia a dia da universidade.

Aos meus pais, João Elias e Ana Maria, e a minha irmã pelo incentivo.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meu agradecimento.



O mais importante não é saber: é nunca  
perder a capacidade de aprender.

Leonardo Boff.



## RESUMO

SARTORI, Aderson. **Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN**. 2010. 235p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2010.

O Método do CN (“Runoff Curve Number Method”) é usado mundialmente para estimar a chuva excedente. As maiores dificuldades de aplicação do método fora do país de origem estão relacionadas com a definição dos grupos hidrológicos de solo e a falta de valores locais de referência para o parâmetro CN. As características gerais dos grupos hidrológicos de solos, inicialmente propostas para os EUA (SCS, 1972), são ainda muito usadas no Brasil. Por serem baseadas principalmente na textura dos solos elas não fornecem critérios objetivos para sua aplicação, pois a textura não é suficiente para classificar um solo hidrologicamente. A classificação hidrológica de solos revisada do “Natural Resources Conservation Service - NRCS” possui critérios claros e objetivos, mas para serem aplicados necessitam de medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil de solo. Estes dados são escassos no Brasil. Assim, neste trabalho foi proposta uma classificação hidrológica de solos alternativa para minimizar a dificuldade de classificar um solo hidrologicamente sem ter dados de condutividade hidráulica saturada. Esta classificação é baseada em propriedades de solos disponíveis nos boletins de levantamento e na classificação dos solos, as quais podem ser usadas como substitutas a condutividade hidráulica saturada. Também foram avaliados seis métodos de calibração do CN (“National Engineering Handbook”; Mínimos Quadrados; Curva de Frequência;  $P/S > 0,46$ ; Assintótico; Frequência Log-normal) e valores de referência foram determinados. Usando 58 perfis de solo com medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil, a classificação hidrológica proposta foi comparada com a do NRCS (2007). Os resultados obtidos mostraram boa correspondência entre elas, indicando que a classificação proposta é adequada à realidade do Brasil. Com dados observados de chuva e escoamento superficial direto em 15 bacias hidrográficas foi realizada uma análise comparativa dos métodos de calibração do CN, que mostrou serem os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados mais adequados para calibrar o CN usando séries totais e parciais. Portanto, estes métodos foram adotados para determinar o CN de referência para os usos: solo nu, solo sem cultivo, milho, soja e trigo em rotação, cana-de-açúcar, eucalipto, cactos e caatinga.

**Palavras Chave:** grupo hidrológico de solo; parâmetro CN; escoamento superficial; calibração; relação chuva-escoamento; hidrologia.



## ABSTRACT

SARTORI, Aderson. **Development of Criteria for Hydrologic Soil Classification and Determination of Reference CN Values.** 2010. 235p. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) - School of Civil Engineering, Architecture and Urbanism – State University of Campinas, Campinas-SP, 2010.

The Runoff Curve Number Method is used worldwide to estimate the rainfall excess, especially for ungauged watersheds. The major difficulties of applying the method outside the USA are related to hydrologic soil groups' definition and lack of local reference values for the CN parameter. The general characteristics of the hydrological soil groups initially proposed to the USA (SCS, 1972), which are based mainly on soil texture, are still widely used in Brazil. These general features do not provide objective criteria for its application within and outside the USA because the texture is not sufficient to assign soils to hydrologic soil groups. The NRCS revised soil hydrological classification (NRCS, 2007) has clear and objectives criteria, but measurements of saturated hydraulic conductivity along the soil profile for its use are needed. These data are scarce in Brazil, which makes difficult its direct application. Thus, in this work it is proposed an alternative soil hydrological classification to minimize the difficulty of classifying a soil without having saturated hydraulic conductivity data. This classification is based on available soil properties in the Brazilian soil survey bulletins and classification, which can work as surrogate of soil hydraulic properties. It is also evaluated six methods of CN calibration (National Engineering Handbook; Least Squares; Frequency Curve;  $P/S > 0.46$ ; Asymptotic; Frequency Log-normal) and reference values were determined. The proposed hydrologic classification was compared with the NRCS hydrologic classification (NRCS, 2007) using 58 soil profiles with measurements of hydraulic conductivity along the profile. The results showed good correspondence between them. This indicates that the proposed hydrologic classification is appropriate for the reality of Brazil. With measured rainfall and runoff data from 15 watersheds was conducted an analysis to compare the six methods of CN calibration. This analysis showed that the Asymptotic and Least Squares methods were the most suitable for the CN calibration using total and partial series. Therefore, these two methods were used to determine the reference CN for the following land uses: bare soil, fallow soil, corn, soybeans and wheat in rotation, sugar cane, eucalyptus, cactus and caatinga.

**Key words:** hydrologic soil group; curve number; direct runoff; calibration; rainfall-runoff relationship; hydrology.





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Ilustração</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1. Gráfico da chuva versus o escoamento superficial direto. Dados da bacia experimental WS-2 do Agricultural Research Service in Treynor, Iowa .....	38
Figura 2.2. Relação entre $I_a$ e $S$ .....	40
Figura 2.3. Gráfico típico para estimativa do CN para outros complexos hidrológicos ou sub-grupos hidrológicos de solos .....	42
Figura 2.4. Comparação dos CNs para 10% e 90% de frequência de excedência com aqueles para AMC I e AMC III publicados pelo SCS (1972) .....	48
Figura 2.5. Variação das capacidades mínimas de infiltração para cultivo em linha sobre solos úmidos. A variação devido ao tratamento anterior é representada pela linha tracejada próxima a média .....	57
Figura 2.6. Grupos Hidrológicos de Solos definidos pela classe textural .....	59
Figura 2.7. Comparação do escoamento observado com o computado usando o princípio da frequência igualada .....	71
Figura 2.8. Relações entre chuva e escoamento adimensionalizadas sobre a retenção potencial máxima na ARC II .....	72
Figura 2.9. Comportamento Padrão. Bacia Coweeta 2, North Carolina .....	75
Figura 2.10. Comportamento Complacente. Bacia West Donaldson, Malheur NF, Oregon .....	75
Figura 2.11. Comportamento Violento. Bacia Berea 6, Kentucky .....	76
Figura 2.12. Procedimento padrão do Método do CN para estimar a chuva excedente em bacias sem monitoramento de chuva e vazão .....	77
Figura 3.1. Locação dos postos de monitoramento de chuva (AR11, AR13 e AR14) e de vazão (AR14) na bacia hidrográfica WARA com traçado dos polígonos de Thiessen .....	90
Figura 3.2. Mapa de solos da bacia hidrográfica WARA .....	92

<b>Ilustração</b>	<b>Página</b>
Figura 3.3. Mapa de uso do solo da bacia hidrográfica WARA .....	92
Figura 4.1. Dados ordenados da bacia CC4129 mostrando comportamento Padrão .....	136
Figura 4.2. Comportamento CN-P da bacia CC298B para série natural e ordenada .....	140
Figura 4.3. Comportamento CN-P da bacia WPAR para série natural e ordenada .....	140
Figura 4.4. Ajuste Assintótico Padrão aos dados observados na bacia WPAR .....	144
Figura 4.5. Ajuste do modelo linear aos dados da bacia WPAR com base na frequência igualada...	145
Figura 4.6. Distribuição de frequência da chuva, do escoamento superficial direto observado e calculado com o CN calibrado com o método dos Mínimos Quadrados para a bacia SUP08 sobre papel probabilístico log-normal .....	149
Figura 4.7. Ajuste Assintótico Padrão aos dados observados na bacia EC02 .....	154
Figura 4.8. Ajuste Assintótico Padrão aos dados observados na bacia EC03 .....	155
Figura 4.9. Relação entre o parâmetro CN e a densidade de resíduos de milho sobre o solo .....	157
Figura 4.10. Bacia CC1135 com 1000 kg/ha de resíduos de milho sobre a superfície .....	157
Figura 4.11. Sistema de plantio direto .....	161
Figura 4.12. Ajuste do modelo Assintótico Padrão aos dados da bacia CC252 mostrando comportamento Complacente .....	164
Figura 4.13. Variabilidade do CN com a chuva total para a bacia CC298 mostrando comportamento Padrão para cobertura parcial e comportamento Complacente para cobertura completa .....	167
Figura 4.14. Variabilidade do CN com a chuva total para a bacia CC299 mostrando comportamento Padrão para cobertura parcial e comportamento Complacente para cobertura completa .....	167
Figura 4.15. CN de referência para três condições de cobertura e três diferentes bacias incluindo o CN de referência para a combinação de duas condições de cobertura .....	169
Figura 4.16. Cana-de-açúcar com diferentes idades: Na foto da esquerda as plantas têm aproximadamente 4 meses e na da direita cerca de seis meses .....	169
Figura 4.17. Ajuste do modelo Assintótico Violento aos dados da bacia SUP07 mostrando comportamento Violento .....	173
Figura 4.18. Ajuste do modelo Assintótico Padrão aos dados da bacia WBOF mostrando comportamento Complacente .....	173

<b>Ilustração</b>	<b>Página</b>
Figura 4.19. Palma cultivada nas bacias SUP06 e SUP07 .....	174
Figura 4.20. Ajuste do modelo Assintótico Padrão aos dados da bacia WARA sem o evento do dia 16/03/2004, mostrando comportamento Complacente .....	175
Figura 4.21. Distribuição de frequência da chuva e do escoamento superficial direto observados na bacia WARA mostrando relação proporcional entre elas .....	176
Figura C-1. Mapa topográfico da Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Guamium.....	230
Figura C-2. Mapa de solos da Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Guamium.....	231
Figura C-3. Mapa de Grupos Hidrológicos de Solos da Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Guamium.....	234



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1. CN para terras agrícolas .....	43
Tabela 2.2. CN para outros usos agrícolas .....	44
Tabela 2.3. CN para áreas urbanas .....	45
Tabela 2.4. CN para terras áridas e semi-áridas .....	46
Tabela 2.5. CN para cana-de-açúcar no Havai .....	46
Tabela 2.6. CN para complexos hidrológicos em Porto Rico .....	47
Tabela 2.7. Classes de umidade antecedente definidas pela chuva antecedente .....	48
Tabela 2.8. Correspondências entre CNs, $I_a$ e $P_c$ .....	55
Tabela 2.9. Critérios para classificação hidrológica de solos .....	61
Tabela 2.10. Capacidades mínimas de infiltração em milímetros por hora para os grupos hidrológicos de solos .....	63
Tabela 2.11. Grupos hidrológicos de solo e condutividade hidráulica saturada média para as classes texturais do USDA .....	64
Tabela 2.12. Probabilidade do escoamento para P/S .....	73
Tabela 3.1. Características das parcelas experimentais de Campinas, SP .....	85
Tabela 3.2. Características das parcelas experimentais de Mococa, SP .....	86
Tabela 3.3. Características das bacias e parcelas da estação experimental de Sumé, PB .....	87
Tabela 3.4. Características adicionais das bacias da estação experimental de Sumé, PB .....	88
Tabela 3.5. Características das parcelas da estação experimental da Embrapa Cerrados .....	88

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 3.6. Características das parcelas do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages, SC ...	89
Tabela 3.7. Principais características físicas da bacia WARA .....	91
Tabela 3.8. Solo e uso da terra na bacia experimental da Aracruz em hectares .....	91
Tabela 3.9. Principais características físicas da bacia WBOF .....	93
Tabela 3.10. Principais características físicas da bacia WPAR .....	94
Tabela 3.11. Principais características físicas da bacia WCAP .....	95
Tabela 3.12. Perfis de solos com medições de condutividade hidráulica saturada .....	96
Tabela 3.13. Base inicial para desenvolver critérios de classificação hidrológica de solos .....	103
Tabela 4.1. Critérios propostos para classificação hidrológica de solos tropicais brasileiros .....	118
Tabela 4.2. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Argissolos .....	123
Tabela 4.3. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Cambissolos .....	124
Tabela 4.4. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Chernossolos .....	126
Tabela 4.5. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Gleissolos .....	127
Tabela 4.6. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Latossolos .....	128
Tabela 4.7. Comparação da condutividade hidráulica saturada entre Latossolos com alto e baixo teor de óxidos de ferro .....	130
Tabela 4.8. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Neossolos .....	131
Tabela 4.9. Resumo estatístico dos eventos observados nas bacias selecionadas .....	137
Tabela 4.10. Valores calibrados do CN com diferentes métodos e séries de dados .....	138
Tabela 4.11. Índice de eficiência para aplicação do Método do CN baseada na frequência igualada .....	141
Tabela 4.12. Índice de eficiência para aplicação do Método do CN baseada na simulação de eventos .....	142
Tabela 4.13. Local, nome e algumas características das bacias com solo nu .....	147
Tabela 4.14. Resultados da calibração do CN para bacias com solo nu .....	148
Tabela 4.15. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias com solo nu .....	148

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 4.16. Local, nome e algumas características das bacias sem cultivo .....	152
Tabela 4.17. Resultados da calibração do CN para bacias sem cultivo .....	153
Tabela 4.18. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias sem cultivo.	154
Tabela 4.19. Estimativa das porcentagens de cobertura do solo para as bacias sem cultivo da unidade experimental do IAC em Campinas com a equação de Lopes et al. (1987) ...	156
Tabela 4.20. Local, nome e algumas características das bacias cultivadas com milho .....	159
Tabela 4.21. Resultados da calibração do CN para bacias cultivadas com milho .....	159
Tabela 4.22. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias cultivadas com milho .....	160
Tabela 4.23. Local, nome e algumas características das bacias cultivadas com soja e trigo em rotação .....	163
Tabela 4.24. Resultados dos métodos de calibração do CN para bacias cultivadas com soja e trigo em rotação .....	163
Tabela 4.25. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias cultivadas com soja e trigo em rotação .....	164
Tabela 4.26. Estimativas gráficas para o CN de referência .....	166
Tabela 4.27. CN calibrado com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados .....	168
Tabela 4.28. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias cultivadas com cana-de-açúcar .....	168
Tabela 4.29. Ajuste da função linear $Q=C.P$ aos dados de cobertura completa .....	171
Tabela 4.30. Local, nome e algumas características das bacias com Caatinga, Cactos e Eucalipto com Mata Ciliar .....	171
Tabela 4.31. Resultados da calibração do CN para bacias com Caatinga, Cactos e Eucalipto com Mata Ciliar .....	172
Tabela 4.32. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias com Caatinga, Cactos e Eucalipto com Mata Ciliar .....	172
Tabela 4.33. CN para solo nu .....	177

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 4.34. CN para solo sem cultivo .....	178
Tabela 4.35. CN para a cultura de milho .....	178
Tabela 4.36. CN para a cultura de soja e trigo em rotação .....	178
Tabela 4.37. CN para a cultura de cana-de-açúcar .....	178
Tabela 4.38. CN para outros usos .....	179
Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado .....	203



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\Sigma$	- Somatório
$\hat{y}_i$	- Valor estimado da variável critério
$y_i$	- Valor medido da variável critério
$\infty$	- Infinito
$\lambda$	- razão entre a abstração inicial e a retenção potencial máxima, isto é, $I_a/S$ [adimensional]
$\rightarrow$	- tender a
AMC	- Condição de Umidade Antecedente
ARC	- Condição de Escoamento Antecedente
AS	- Método Assintótico
C & T + CR	- plantio em contorno com terraceamento e resíduos culturais na superfície
C & T	- plantio em contorno com terraceamento
$C$	- parâmetro do modelo linear $Q=C.P$ [L/L]
C	- plantio em contorno
CN	- Curve Number; Número da Curva de Escoamento
$CN_{\infty}$	- Valor assintótico do CN tomado como referência
$CN_0$	- Valor limite do CN para que não haja escoamento superficial [adimensional]
$CO$	- Índice sazonal, função da data e da temperatura [adimensional]
CR	- cobertura do solo com resíduos culturais
$D$	- Duração da chuva [T]
DAEE	- Departamento de Águas e Energia Elétrica
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem

DF	- Distrito Federal
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EF	- Índice de Eficiência de Nash-Stucliffe
EM	- Erro médio
Embrapa	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ES	- Estado do Espírito Santo
EUA	- Estados Unidos da América
$F$	- retenção efetiva; perda efetiva por infiltração após o escoamento iniciar [L]
FM	- Método da Curva de Frequência
$FO()$	- Função objetivo
GHS	- Grupo Hidrológico de Solo
$GM$	- Média Geométrica
$I_a$	- Abstração inicial; parcela da chuva que é interceptada, armazenada em depressões superficiais e infiltrada antes do escoamento iniciar [L]
IAC	- Instituto Agrônomo de Campinas
$k$	- Coeficiente de decaimento do método Assintótico [1/L]
$K_s$	- Condutividade hidráulica saturada [L/T]
LN	- Método Log-normal
LS	- Método dos Mínimos Quadrados
$M$	- Chuva antecedente de 5 dias [L]
MHRG	- Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Guamium
$N$	- Número de eventos
NEH	- National Engineering Handbook
NRCS	- Natural Resources Conservation Service
$P$	- Chuva [L]
$p$	- Número de parâmetros estimados a partir da amostra
PB	- Estado da Paraíba
$P_c$	- Chuva crítica [L]
$PQ$	- sistema cartesiano em que o eixo das abscissas assume os valores de $P$ e o eixo das ordenadas assume os valores de $Q$
$Q$	- Escoamento Superficial Direto [L]

R	- linguagem e ambiente para cálculos e gráficos estatísticos
$r^2$	- Coeficiente de determinação
S	- retenção potencial máxima; máxima perda por infiltração após o escoamento iniciar [L]
$S_{0,05}$	- Retenção potencial máxima para $\lambda = I_a/S = 0,05$ [L]
$S_{0,2}$	- Idem S [L]
SC	- Estado de Santa Catarina
SCS	- Soil Conservation Service
SE	- Erro padrão
SiBCS	- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SP	- Estado de São Paulo
SR + CR	- plantio em linha reta com resíduos culturais na superfície
SR	- plantio em linha reta, obliquamente a ou no sentido da declividade
$S_s$	- Índice dos solos [polegadas de água por hora]
STB	- Estabilidade
T	- Índice da prática de cobertura [adimensional]
T	- Capacidade de Troca de Cátions da fração argila [cmol/kg de argila]
Ta	- Argila de atividade alta
Tb	- Argila de atividade baixa
Tr	- Período de retorno
TR55	- Technical Release 55
UDESC	- Universidade Estadual de Santa Catarina
UFPB	- Universidade Federal da Paraíba
USDA	- United States Department of Agriculture



## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>19</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>23</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
1.1. Objetivos .....	34
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>35</b>
2.1. Método do CN .....	35
2.1.1. Origem e desenvolvimento da equação do escoamento .....	35
2.1.2. Complexo hidrológico solo-cobertura e tabelas do CN .....	41
2.1.3. Condição de umidade/escoamento antecedente .....	47
2.1.4. Efeito do uso da terra sobre o CN .....	49
2.1.5. Efeito da chuva sobre o CN .....	50
2.1.6. Efeito da área de drenagem sobre o CN .....	51
2.1.7. Abstração inicial ( $I_a$ ) e sua relação com a retenção potencial máxima ( $S$ ) .....	52
2.1.8. Sensibilidade .....	55
2.2. Classificação hidrológica de solos .....	56
2.2.1. Definição dos grupos hidrológicos de solos .....	56
2.2.2. Pesquisas realizadas nos EUA .....	63
2.2.3. Esforços brasileiros .....	66
2.3. Métodos para calibração do CN .....	68
2.3.1. Método do National Engineering Handbook - NEH .....	69
2.3.2. Método dos Mínimos Quadrados - LS .....	69

	<b>Página</b>
2.3.3. Método da Curva de Frequência - FM .....	70
2.3.4. Método P/S > 0,46 .....	71
2.3.5. Método Assintótico - AS .....	73
2.3.6. Método da Frequência Log-normal - LN .....	76
2.4. Considerações finais .....	76
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>81</b>
3.1. Introdução .....	81
3.2. Dados .....	82
3.2.1. Dados hidrológicos .....	83
3.2.2. Dados de condutividade hidráulica saturada .....	95
3.3. Elaboração de critérios para classificação hidrológica de solos .....	99
3.4. Aplicação dos critérios propostos e dos critérios do NRCS (2007) para classificação hidrológica de alguns solos brasileiros .....	103
3.5. Procedimentos para calibração do CN .....	104
3.6. Análise dos métodos de calibração do parâmetro CN .....	109
3.6.1. Escolha das bacias .....	110
3.6.2. Critério para escolha dos métodos de calibração .....	111
3.7. Determinação do CN de referência .....	111
3.7.1. Critérios para calibração e escolha do CN de referência .....	112
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>115</b>
4.1. Critérios propostos para classificação hidrológica de solos .....	115
4.2. Aplicação das classificações hidrológicas proposta e do NRCS (2007) .....	121
4.2.1. Comentários gerais sobre a correspondência entre a classificação hidrológica proposta e a do NRCS (2007) .....	133
4.3. Análise dos métodos de calibração do parâmetro CN .....	135
4.3.1. Escolha das bacias e características dos eventos .....	135
4.3.2. Parâmetro CN e resposta da bacia .....	137
4.3.3. Influência do tratamento dos dados na calibração do CN .....	139
4.3.4. Comentários gerais e escolha dos métodos de calibração do CN .....	143

	<b>Página</b>
4.4. Determinação do CN para alguns usos e manejos do solo .....	146
4.4.1. CN para solo nu .....	147
4.4.2. CN para solo sem cultivo .....	151
4.4.3. CN para a cultura de milho .....	158
4.4.4. CN para a cultura de soja e trigo em rotação .....	162
4.4.5. CN para a cultura de cana-de-açúcar .....	165
4.4.6. CN para outros usos .....	171
4.4.7. Síntese dos valores de referência estabelecidos para o parâmetro CN .....	177
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>181</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>185</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>199</b>
APÊNDICE A - Dados de condutividade hidráulica saturada .....	201
APÊNDICE B - Código fonte dos programas em linguagem R para calibração do parâmetro CN usando os métodos: Assintótico, Mínimos Quadrados e P/S > 0,46 .....	213
APÊNDICE C - Exemplo de aplicação da Classificação Hidrológica Proposta .....	227





## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da vazão, do volume e do hidrograma de escoamento superficial direto gerado pela chuva é de fundamental importância no planejamento, projeto e operação de obras hidráulicas e sistemas agrícolas. Nos projetos que envolvem a quantificação do escoamento superficial direto em bacias hidrográficas sem monitoramento é necessário um modelo para estimar a parcela da chuva total que irá se transformar no escoamento superficial direto, isto é, para estimar a chuva excedente. Dentre os modelos disponíveis, talvez o mais usado seja o conhecido “Runoff Curve Number Method” ou Método do Número da Curva de Escoamento, simplesmente chamado de Método do CN. Ele foi desenvolvido pelo “Natural Resources Conservation Service” (NRCS) – antigo “Soil Conservation Service” (SCS) – do “United States Department of Agriculture” (USDA) para estimar a chuva excedente a partir de chuvas totais. Então, o Método do CN é um modelo para estimativa da parcela da chuva total que não se perdeu por interceptação, armazenamento em depressões e infiltração no solo.

Para estimar a chuva excedente (i.e., o volume de escoamento superficial direto) a partir de eventos de chuva, o Método do CN considera os principais fatores que afetam a geração do escoamento, incluindo as características hidrológicas dos solos na forma de grupos hidrológicos de solo, a cobertura da terra, as práticas conservacionistas e as condições de escoamento antecedente da bacia. Todos estes fatores estão combinados em um índice chamado Número da Curva de Escoamento (CN), parâmetro característico da técnica. A aplicação do método para bacias sem monitoramento de chuva e vazão consiste, por padrão, na seleção do parâmetro CN nas tabelas publicadas no manual de origem norte-americana, onde o CN é escolhido em função do grupo hidrológico de solo, do uso e manejo da terra. Uma importante característica de seu emprego é a classificação dos solos em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) de acordo com

o potencial de escoamento superficial, sendo A o grupo de menor potencial e o D de maior potencial. O uso da tabela original do parâmetro CN é habitual, uma vez que não existam calibrações do CN para as condições locais. Nesta situação engenheiros e hidrólogos têm a difícil tarefa de estimar o parâmetro CN baseando-se em informações contidas em mapas de solo e de uso da terra.

Devido a sua simplicidade, versatilidade e credibilidade da agência desenvolvedora, o método se tornou popular nos EUA e também passou a ser usado internacionalmente (PONCE e HAWKINS, 1996). Por exemplo, em 1991 no Brasil ele já era um dos cinco métodos mais usados em projetos hidrológicos para bacias hidrográficas sem dados observados (GENOVEZ, 1991). Além disso, o método é sugerido para projeto em normas e manuais publicados por agências governamentais brasileiras. Como observado por vários autores (HJELMFELT et al., 2001; WOODWARD et al., 2002; HAWKINS et al., 2002) o Método do CN tem sido incorporado em modelos hidrológicos computacionais para a estimativa da chuva excedente. Assim, sua aplicação tem sido expandida para modelagem de bacias com e sem dados observados de chuva e vazão. Exemplos dessa aplicação no Brasil são os estudos para prever a erosão em bacia hidrográfica monitorada (MACHADO, 2002) e não monitorada (BARRETO NETO, 2004), e para planejamento de bacias (MORO, 2005). Sua escolha pode estar relacionada a três motivos: (a) permite considerar a cobertura do solo, sendo possível fazer a simulação de cenários; (b) facilidade de uso, ou seja, é um modelo simples e de fácil compreensão; (c) possui boa base de conhecimento e parâmetros disponíveis para sua aplicação. Contudo, estas informações e parâmetros foram determinados para condições específicas dos EUA.

As características gerais da definição dos grupos hidrológicos de solos inicialmente propostos para os EUA (SCS, 1972) são ainda muito usadas no Brasil e, por não apresentarem critérios bem definidos, sua interpretação varia de acordo com o usuário, que na maioria dos casos usa a simplificação baseada nas classes texturais. Interpretações subjetivas dos grupos hidrológicos de solos podem conduzir a erros e/ou inconsistências na sua aplicação. Isso foi observado nos EUA (NIELSEN e HJELMFELT, 1998), o que levou a revisão da classificação hidrológica de solo original do Método do CN. Na nova versão os critérios estão baseados essencialmente na profundidade da camada restritiva, na profundidade do nível d'água

subterrâneo e na condutividade hidráulica saturada do horizonte menos permeável do perfil de solo analisado (NRCS, 2007). Embora a inclusão da condutividade hidráulica saturada na definição dos grupos hidrológicos de solo tenha tornado a classificação revisada (NRCS, 2007) mais objetiva que sua versão anterior (SCS, 1972) e, portanto, pouco sujeita a interpretações subjetivas, a falta de dados observados e disponíveis sobre condutividade hidráulica saturada de solos ao longo do perfil dificulta ou inviabiliza sua aplicação no Brasil. Além disso, poucos esforços têm sido realizados no sentido de adaptar a definição original dos grupos hidrológicos de solo do Método do CN para o Brasil. As propostas de Setzer e Porto (1979) e de Kutner et al. (2001) são difíceis de aplicar por não ser conhecida a posição espacial de cada grupo hidrológico no interior da bacia. A proposta de Lombardi Neto et al. (1989) e sua revisão por Sartori (2004) e Sartori et al. (2005a) ainda possuem critérios que estão sujeitos a interpretações subjetivas, ou seja, a interpretações inconsistentes por diferentes usuários. Além disso, não consideram a influência da profundidade de ocorrência da mudança textural abrupta ou de outras camadas mais restritivas a permeabilidade.

Sendo assim, neste trabalho é proposta uma nova classificação hidrológica de solos, a qual é comparada com a classificação hidrológica de solos revisada do NRCS. Para isso foram selecionados 58 perfis de solos brasileiros com medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil. O objetivo da classificação hidrológica de solos proposta é classificar um solo hidrológicamente sem a necessidade de medições locais de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil, reduzindo assim os custos de sua aplicação.

Além disso, neste trabalho são avaliados os métodos de calibração do CN que usam ou derivam da relação chuva-escoamento do método, ou seja, métodos que usam apenas os pares de eventos observados de chuva e escoamento superficial resultante. Estes são: (1) “National Engineering Handbook - NEH”; (2) Mínimos Quadrados - LS; (3) Curva de Frequência - FM; (4)  $P/S > 0,46$ ; (5) Assintótico - AS; (6) Frequência Log-normal - LN. O objetivo dessa avaliação é escolher métodos para a calibração do CN para alguns usos do solo, cujos dados foram disponibilizados para a realização desta pesquisa. Portanto, este trabalho de pesquisa visa contribuir com o conhecimento e aprimoramento do Método do CN para aplicação no Brasil.

## 1.1. Objetivos

Os objetivos deste estudo são:

- Propor uma classificação hidrológica de solos com critérios baseados em propriedades do solo que estão comumente presentes nos boletins de levantamentos e mapas de solo do Brasil;
- Aplicar as classificações hidrológicas de solos proposta e do NRCS (2007) a 58 perfis de solos brasileiros com medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil e comparar os resultados;
- Avaliar os métodos de calibração do parâmetro CN e escolher métodos para serem usados na determinação do CN de referência;
- Determinar o CN de referência usando os métodos escolhidos pela análise referida no item anterior para alguns complexos hidrológicos envolvendo os usos solo nu, solo sem cultivo, milho, soja e trigo em rotação, cana-de-açúcar, eucalipto, cactos e caatinga.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Método do CN**

O Método do CN foi desenvolvido para estimar o escoamento superficial direto (i.e., chuva excedente) a partir de chuvas para pequenas e médias bacias hidrográficas. Sua facilidade de uso, razoável disponibilidade de dados para seu parâmetro e confiança da agência desenvolvedora o tornou popular, sendo atualmente um dos métodos mais utilizados para estimativa da chuva excedente em muitos países. Neste item serão apresentados detalhes do método, os quais incluem sua origem, desenvolvimento e algumas de suas características relevantes.

#### **2.1.1. Origem e desenvolvimento da equação do escoamento**

Em 1933 foi criada nos Estados Unidos da América (EUA) a agência Serviço de Erosão do Solo com objetivo de apresentar planos de conservação do solo e da água além de supervisionar a execução de projetos de medidas de conservação do solo e da água. Em 1935 a Lei de Conservação do Solo alterou o nome da agência para Serviço de Conservação do Solo (Soil Conservation Service – SCS) (WOODWARD et al., 2002).

Visando atender aos objetivos que lhe foram incumbidos, o SCS deu-se conta que existia a necessidade de obter dados hidrológicos e de estabelecer um procedimento simples para estimar as taxas de escoamento. Com a publicação da Lei de Controle de Inundação em 1936 (Lei

Pública 74-738), o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA, sigla em inglês) foi autorizado a realizar levantamentos e investigações em bacias hidrográficas para tomar medidas que retardassem o escoamento e prevenissem a erosão do solo. O objetivo era obter dados básicos para avaliar o efeito dos procedimentos na bacia e/ou das medidas de conservação sobre o escoamento (RALLISON e MILLER, 1982).

Os dados obtidos das bacias experimentais eram escassos e cobriam uma pequena fração das condições encontradas. Para obter os dados necessários para avaliar os efeitos das medidas de conservação propostas, milhares de testes de infiltrômetros foram feitos no fim da década de 1930 e início da década de 1940, sendo a grande maioria com infiltrômetros de aspersão. Neste período o SCS contratou três consultores privados, W.W. Horner, R.E. Horton e L.K. Sherman, para auxiliar no desenvolvimento de um método racional de estimativa do escoamento, a partir de uma dada parcela de terra sob várias condições de cobertura. O resultado dos estudos foi um método que tinha uso restrito porque requeria o registro contínuo da chuva, o qual era limitado em muitas áreas (RALLISON e MILLER, 1982).

Sherman (1949) propôs fazer um gráfico do escoamento direto versus a chuva total. Aproveitando esta idéia, Mockus (1949) propôs que o escoamento direto poderia ser estimado a partir de informações sobre solos, uso da terra, chuva antecedente, duração da chuva e total precipitado, média anual da temperatura e data do evento. Estes fatores foram combinados em um parâmetro empírico,  $b$ , caracterizando a relação entre chuva e escoamento (RALLISON e MILLER, 1982).

$$Q = P \cdot (1 - 10^{-b \cdot P}) \quad (2.1)$$

sendo  $Q$  o escoamento superficial direto em polegadas,  $P$  a chuva em polegadas e  $b$  o parâmetro relacionando todos os fatores considerados:

$$b = \frac{0,0374 \cdot 10^{0,229 \cdot M} \cdot CO^{1,061}}{T^{1,990} \cdot D^{1,333} \cdot 10^{2,271 \cdot (Ss/D)}} \quad (2.2)$$

sendo  $M$  a chuva antecedente de 5 dias em polegadas,  $CO$  o índice da prática de cobertura,  $T$  um índice sazonal, o qual é função da data e da temperatura ( $^{\circ} F$ );  $D$  a duração da chuva em horas e  $Ss$  um índice dos solos, em polegadas de água por hora.

Andrews (1954) usou dados de testes de infiltração realizados no Texas, Oklahoma, Arkansas e Louisiana para desenvolver um método gráfico que pudesse estimar o escoamento superficial direto a partir da chuva para combinações de textura do solo, tipo e quantidade de cobertura da terra, e práticas conservacionistas. Esta associação foi referida como um “complexo hidrológico solo-cobertura” (RALLISON e MILLER, 1982).

A Lei de Proteção de Bacia e Prevenção de Inundação publicada em agosto de 1954 (Lei Pública 83-566) deixou claro que o SCS precisava de um procedimento que fosse baseado nos dados disponíveis e que pudesse ser aplicado nacionalmente. Os modelos de Sherman (1949) e outros eram para bacias monitoradas, mas a maioria dos trabalhos do SCS envolvia bacias sem monitoramento. As relações entre chuva e escoamento desenvolvidas por Mockus (1949) e Andrews (1954) eram bastante gerais e não era necessário ter um medidor de vazão na bacia para aplicá-los. Estes trabalhos formaram a base para o desenvolvimento da equação do Método do CN (RALLISON e MILLER, 1982; WOODWARD et al., 2002).

Os gráficos de chuva versus escoamento superficial mostravam que a tendência era côncava para cima. Com o aumento da chuva a tendência tornava-se assintótica a uma reta com inclinação de  $45^{\circ}$ . Aparentemente a tendência iniciava-se na origem do sistema cartesiano e havia considerável dispersão em seu entorno. Um exemplo destes gráficos é apresentado na Figura 2.1. O problema era encontrar uma relação matemática que descrevesse tal padrão.

Após tentar várias relações, Mockus encontrou que a curva apropriada resultava da seguinte hipótese: “A relação entre o volume de água de chuva retido no solo e o máximo volume a ser preenchido com água de chuva após o escoamento iniciar é igual à relação entre o volume escoado superficialmente e o volume máximo possível de se escoar”, isto é:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad (2.3)$$

sendo  $F$  a perda efetiva por infiltração após o escoamento iniciar, ou seja, a retenção efetiva após o início do escoamento,  $S$  a máxima perda por infiltração após o escoamento iniciar ( $S \geq F$ ), ou seja, o potencial máximo de retenção após o início do escoamento,  $Q$  o escoamento superficial direto e  $P$  a chuva; todos com dimensão de comprimento. Observa-se que a igualdade das razões é satisfeita nos limites, quando  $P \rightarrow 0$  então  $Q/P = F/S \rightarrow 0$ , e quando  $P \rightarrow \infty$  então  $Q/P \approx F/S \rightarrow 1$ . Visto que a relação é válida para os dois limites, assume-se que seja válida também para todos os pontos intermediários (WOODWARD et al., 2002).

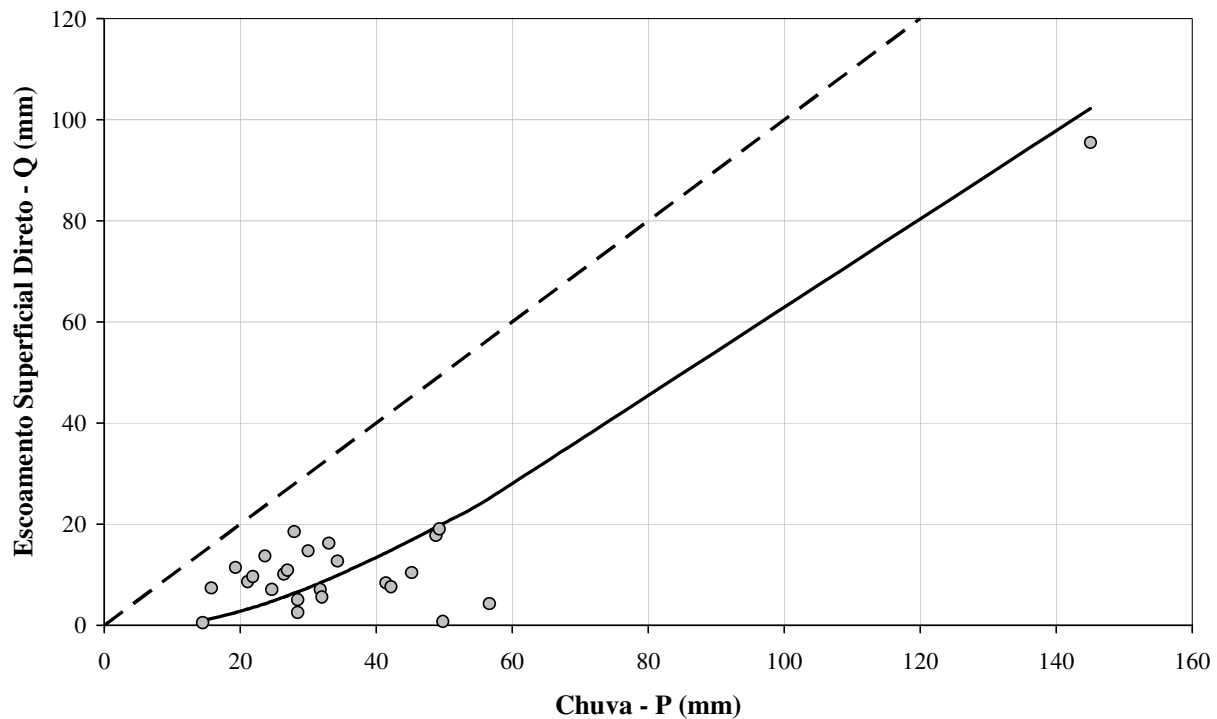


Figura 2.1. Gráfico da chuva versus o escoamento superficial direto. Dados da bacia experimental WS-2 do Agricultural Research Service in Treynor, Iowa. Fonte: NRCS (1997).

Para satisfazer a conservação de massa:

$$F = P - Q \tag{2.4}$$

Substituindo a Equação 2.4 na Equação 2.3 e resolvendo para  $Q$ , obtêm-se:



$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (2.5)$$

A Equação 2.5 foi a primeira versão da equação do escoamento e não continha um termo para a abstração inicial,  $I_a$ , a qual representa a parcela da chuva que é interceptada, armazenada em depressões superficiais e infiltrada antes do escoamento iniciar. Para considerar esta parcela e corrigir as Equações 2.4 e 2.5 a abstração inicial foi deduzida da chuva resultando:

$$F = P - I_a + Q \quad (2.6)$$

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} & \text{para } P \geq I_a \\ 0 & \text{para } P \leq I_a \end{cases} \quad (2.7)$$

A abstração inicial pode ser determinada a partir de eventos observados em pequenas bacias onde o tempo de retardamento é mínimo. Ela é a chuva que ocorre antes do escoamento iniciar. Interceptação e armazenamento em depressões superficiais podem, talvez, ser estimados a partir das condições de cobertura e da superfície, mas a infiltração durante o início da chuva é muito variável e dependente de fatores como a intensidade da chuva, o selamento superficial e umidade do solo. Então, não é fácil estabelecer uma relação para estimar a abstração inicial. Por esse motivo e para eliminar a necessidade de estimar os parâmetros ( $I_a$  e  $S$ ) para a solução da Equação 2.7, uma relação empírica entre  $I_a$  e  $S$  foi desenvolvida com base em dados observados (ver Figura 2.2), a qual assume que  $I_a$  é uma parcela do parâmetro  $S$ , ou seja:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (2.8)$$

A equação do escoamento é então obtida substituindo a Equação 2.8 na Equação 2.7:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} & \text{para } P \geq 0,2 \cdot S \\ 0 & \text{para } P \leq 0,2 \cdot S \end{cases} \quad (2.9)$$

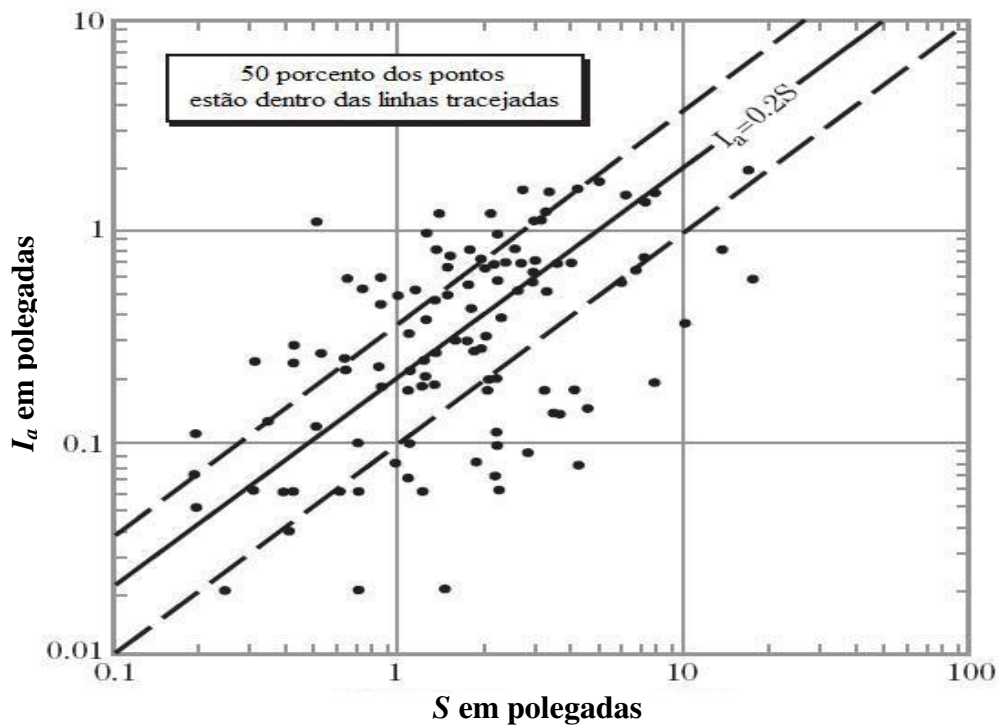


Figura 2.2. Relação entre  $I_a$  e  $S$ . Fonte: NRCS (2004b).

A Equação 2.9 é simples e inclui a chuva ( $P$ ) e as condições da terra ( $S$ ). Contudo, o escoamento ( $Q$ ) varia inversamente com a  $S$ , ou seja, se  $S = 0$ , então  $Q = P$  e se  $S \rightarrow \infty$ , então  $Q \rightarrow 0$ . Portanto, para tornar o método mais intuitivo com o parâmetro que refletia as condições da terra, foi proposta a transformação:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad (2.10)$$

sendo CN o número da curva de escoamento (adimensional),  $S$  em polegadas, 10 e 1000 dois números em polegadas escolhidos para que o novo parâmetro variasse positivamente com o escoamento e dentro de um limite, zero e 100. Assim, para o limite superior tem-se  $CN = 100$ ,  $S = 0$  e  $Q = P$ , e para o limite inferior tem-se  $CN \rightarrow 0$ ,  $S \rightarrow \infty$  e  $Q \rightarrow 0$ .

As Equações 2.9 e 2.10 foram usadas para determinar valores do parâmetro CN para todas as condições cobertas pelos dados experimentais. As Equações 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 são

dimensionalmente consistentes, mas a Equação 2.10 é a transformação do parâmetro  $S$  em polegadas. Então, se o parâmetro  $S$  estiver em milímetros resulta:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad (2.11)$$

### 2.1.2. Complexo hidrológico solo-cobertura e tabelas do CN

O termo “complexo hidrológico solo-cobertura” foi introduzido por Andrews (1954) para representar uma combinação da textura do solo, tipo e quantidade de cobertura, e práticas de conservação do solo.

Após o desenvolvimento da equação do escoamento, de seu parâmetro CN e da classificação hidrológica de solos, um complexo hidrológico solo-cobertura ficou definido como “a combinação de um grupo hidrológico de solo com uma classe de uso e tratamento da terra”.

A classificação hidrológica de solos foi proposta por Musgrave (1955) para ter quatro grupos hidrológicos, A, B, C e D, assim denominados de acordo com a capacidade mínima de infiltração. Os solos arenosos foram incluídos no grupo A e os argilosos (menores capacidades de infiltração) no grupo D.

Uma classe de uso e tratamento da terra é a combinação de um tipo de uso com um tipo de tratamento. O uso da terra é a cobertura da bacia e inclui todo o tipo de vegetação, usos agrícolas tal como cobertura morta, sem cultivo e solo nu, e usos não agrícolas como superfícies d’água e superfícies impermeáveis (NRCS, 2002). O tratamento da terra aplica-se principalmente a áreas agrícolas e inclui práticas mecânicas, tal como contorno e terraceamento, e práticas de manejo, tais como controle de pastoreio e rotação de culturas (NRCS, 2002).

O parâmetro CN foi desenvolvido para vários complexos hidrológicos usando eventos de chuva-escoamento para cheias máximas anuais observadas em bacias hidrográficas com área

inferior a 3 km<sup>2</sup> e com um único complexo hidrológico (SCS, 1972). Devido à variabilidade amostral do parâmetro CN, seu valor mediano foi usado como referência para um particular complexo, representando aproximadamente as condições médias sobre a bacia.

Quando havia mais de uma bacia para um mesmo complexo hidrológico solo-cobertura, a média dos valores do CN foi tomada como referência para o determinado complexo. Para os complexos faltantes, o CN foi determinado por interpolação/extrapolação usando gráficos para cada tipo de cobertura, onde o CN era disposto contra os grupos hidrológicos, conforme mostra a Figura 2.3. Os valores do CN publicados para cada complexo hidrológico são valores que representam as condições médias da bacia e estão apresentados nas Tabelas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6

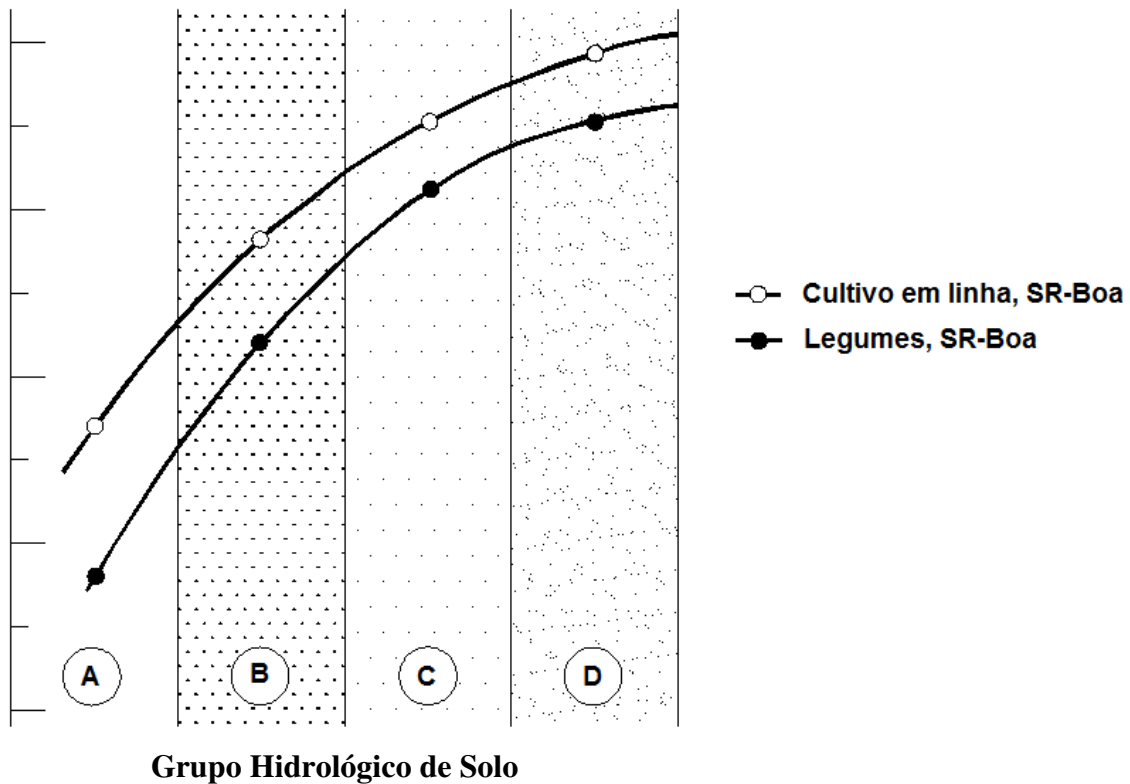


Figura 2.3. Gráfico típico para estimativa do CN para outros complexos hidrológicos ou subgrupos hidrológicos de solos. Fonte: SCS (1972).

Tabela 2.1. CN para terras agrícolas<sup>1/</sup>. Fonte: Adaptada de NRCS (2004a).

----- Descrição da cobertura -----			CN para o grupo			
Tipo de cobertura	Tratamento <sup>2/</sup>	Condição hidrológica <sup>3/</sup>	A	B	C	D
<i>Sem cultivo</i> é o uso e tratamento que mantém a terra agrícola tão nua quanto possível para conservar umidade para o uso de uma cultura sucessiva.	Solo nu	---	77	86	91	94
		Deficiente	76	85	90	93
	CR	Boa	74	83	88	90
		Deficiente	72	81	88	91
	SR	Boa	67	78	85	89
		Deficiente	71	80	87	90
	SR + CR	Boa	64	75	82	85
		Deficiente	70	79	84	88
	C	Boa	65	75	82	86
		Deficiente	69	78	83	87
C + CR	Boa	64	74	81	85	
	Deficiente	66	74	80	82	
C & T	Boa	62	71	78	81	
	Deficiente	65	73	79	81	
C & T + CR	Boa	61	70	77	80	
	Deficiente	65	76	84	88	
SR	Boa	63	75	83	87	
	Deficiente	64	75	83	86	
SR + CR	Boa	60	72	80	84	
	Deficiente	63	74	82	85	
C	Boa	61	73	81	84	
	Deficiente	62	73	81	84	
C + CR	Boa	60	72	80	83	
	Deficiente	61	72	79	82	
C & T	Boa	59	70	78	81	
	Deficiente	60	71	78	81	
C & T + CR	Boa	58	69	77	80	
	Deficiente	66	77	85	89	
SR	Boa	58	72	81	85	
	Deficiente	64	75	83	85	
C	Boa	55	69	78	83	
	Deficiente	63	73	80	83	
C & T	Boa	51	67	76	80	

1/ Condição média de escoamento e Ia = 0,2.S.

2/ CR: cobertura com resíduos culturais; SR: plantio em linha reta, obliquamente ou no sentido da declividade; SR + CR: plantio em linha reta com resíduos culturais na superfície; C: plantio em contorno; C + CR: plantio em contorno com resíduos culturais na superfície; C & T: plantio em contorno com terraceamento; C & T + CR: plantio em contorno com terraceamento e resíduos culturais na superfície.

3/ A condição hidrológica está baseada nas combinações dos fatores que afetam a infiltração e o escoamento, incluindo (a) dossel e densidade das áreas vegetativas, (b) quantia de cobertura no ciclo de um ano, (c) quantia de grama ou sementeira de legumes, (d) porcentagem da superfície de terra coberta com resíduos (boa  $\geq$  20%), e (e) grau de resistência superficial.

Deficiente: Fatores impedem a infiltração e tendem a aumentar o escoamento.

Boa: Fatores melhoram a infiltração e tendem a reduzir o escoamento.

Prática conservacionista “Deficiente”: 5 a 20 % da superfície é coberta com resíduo (menos que 840 kg/ha para cultivos em linha ou 370 kg/ha para pequenos grãos).

Prática conservacionista “Boa”: mais do que 20 % da superfície é coberta com resíduo (mais que 840 kg/ha para cultivos em linha ou 370 kg/ha para pequenos grãos).

Tabela 2.2. CN para outros usos agrícolas<sup>1/</sup>. Fonte: Adaptada de NRCS (2004a).

----- Descrição da cobertura -----		CN para o grupo				
Tipo de cobertura	Tratamento <sup>2/</sup>	Condição hidrológica <sup>3/</sup>	A	B	C	D
<i>Pastagem</i> com forragem contínua para pastoreio <sup>4/</sup>		Deficiente	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Boa	39	61	74	80
<i>Prados</i> (grama contínua, protegida do pastoreio e geralmente ceifada para feno)		---	30	58	71	78
<i>Capoeira</i> (Mistura de arbustos, gramíneas e herbáceas florescentes, sendo os arbustos em maior quantidade) <sup>5/</sup>		Deficiente	48	67	77	83
		Regular	35	56	70	77
		Boa	30 <sup>6/</sup>	48	65	73
<i>Combinação de bosques (pomares ou árvores) e gramíneas</i> <sup>7/</sup>		Deficiente	57	73	82	86
		Regular	43	65	76	82
		Boa	32	58	72	79
<i>Bosques</i> (pequenos aglomerados de árvores dispostas proximamente entre si) <sup>8/</sup>		Deficiente	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Boa	30	55	70	77
<i>Sede de fazendas</i> - construções, caminhos pavimentados, entrada para carros e lotes adjacentes		---	59	74	82	86
<i>Estradas de terra</i> (incluindo faixa de domínio)		---	72	82	87	89
<i>Estradas pedregulhadas</i> (incluindo faixa de domínio)		---	76	85	89	91

1/ Condição média de escoamento e  $I_a = 0,2.S$ .

3/ A condição hidrológica:

4/ Deficiente: < 50% da superfície está coberta ou muito pastoreada sem vegetal em decomposição.  
Regular: 50 a 75% da superfície está coberta ou não muito pastoreada.  
Boa: > 75% da superfície está coberta ou ocasionalmente pastoreada.

5/ Deficiente: < 50% da superfície está coberta.  
Regular: 50 a 75% da superfície está coberta.  
Boa: > 75% da superfície está coberta.

8/ Deficiente: Liteira, pequenas árvores, e arbustos são destruídos pelo pastoreio intensivo ou pelas queimadas regulares.  
Regular: Os bosques são pastoreados, mas não queimados, e alguma liteira cobre o solo.  
Boa: Os bosques são protegidos do pastoreio, e a liteira e os arbustos cobrem adequadamente o solo.

6/ Se o verdadeiro CN for menor do que 30, use 30 para a estimativa do escoamento.

7/ Os CNs apresentados foram estimados para áreas com 50% de bosques e 50 por cento de gramíneas (pastagem). Outras combinações podem ser estimadas a partir dos CNs para bosques e pastagens.

Tabela 2.3. CN para áreas urbanas<sup>1/</sup>. Fonte: NRCS (2004a).

Descrição da cobertura	Porcentagem média da área impermeável <sup>2/</sup>	CN para o grupo			
		A	B	C	D
Áreas urbanas desenvolvidas (vegetação existente)					
Espaço aberto (gramados, parques, campos de golfe, cemitérios, etc.) <sup>3/</sup>					
Condição deficiente (cobertura com grama < 50%)		68	79	86	89
Condição regular (cobertura com grama 50 a 75%)		49	69	79	84
Condição boa (cobertura com grama > 75%)		39	61	74	80
Áreas Impermeáveis:					
Estacionamentos pavimentados, telhados, entrada para carros em moradias, etc. (excluindo faixa de domínio)		98	98	98	98
Ruas e rodovias:					
Pavimentadas com calçadas, guias e galeria de drenagem (não incluindo faixa de domínio)		98	98	98	98
Pavimentadas com canais abertos (incluindo faixa de domínio)		83	89	92	93
Pedregulhadas (incluindo faixa de domínio)		76	85	89	91
De terra (incluindo faixa de domínio)		72	82	87	89
Áreas urbanas no deserto (meio oeste dos EUA):					
Paisagem natural do deserto (somente áreas permeáveis) <sup>4/</sup>		63	77	85	88
Paisagem artificial do deserto (barreiras impermeáveis com ervas, arbustos do deserto com 25 a 50 mm de material em decomposição com areia ou pedregulho na borda do caule)		96	96	96	96
Zonas urbanas:					
Comerciais e serviços	85%	89	92	94	95
Industriais	72%	81	88	91	93
Residenciais pela média do tamanho dos lotes:					
500 m <sup>2</sup> ou menor (casas de cidades)	65%	77	85	90	92
1000 m <sup>2</sup>	38%	61	75	83	87
1350 m <sup>2</sup>	30%	57	72	81	86
2000 m <sup>2</sup>	25%	54	70	80	85
4000 m <sup>2</sup>	20%	51	68	79	84
8000 m <sup>2</sup>	12%	46	65	77	82
Áreas urbanas em desenvolvimento					
Áreas alteradas recentemente (somente áreas permeáveis, sem vegetação)		77	86	91	94

1/ Condição média de escoamento e Ia = 0,2.S.

2/ As porcentagens apresentadas de área impermeabilizada foram usadas para desenvolver os CNs compostos. Outras suposições são: áreas impermeáveis diretamente conectadas ao sistema de drenagem, áreas impermeáveis têm um CN de 98, e as áreas permeáveis são consideradas equivalentes a espaços abertos em boa condição hidrológica.

3/ Os CNs apresentados são equivalentes àqueles de pastagem. CNs compostos podem ser estimados para outras combinações de espaço aberto.

Tabela 2.4. CN para terras áridas e semi-áridas<sup>1/</sup>. Fonte: NRCS (2004a).

----- Descrição da cobertura ----- Tipo de cobertura	Condição hidrológica <sup>2/</sup>	CN para o grupo			
		A <sup>3/</sup>	B	C	D
Herbáceos - mistura de grama, ervas e jovens arbustos, sendo estes em menor quantidade.	Deficiente		80	87	93
	Regular		71	81	89
	Boa		62	74	85
Carvalho-choupo - mistura de arbustos de montanha tal como carvalho, choupo, mogno, bordo e outros arbustos.	Deficiente		66	74	79
	Regular		48	57	63
	Boa		30	41	48
Pinus-junípero - pinus, junípero, ou ambos; gramíneas na superfície do solo abaixo do dossel	Deficiente		75	85	89
	Regular		58	73	80
	Boa		41	61	71
Sálvia-grama - sálvia com gramíneas abaixo do dossel	Deficiente		67	80	85
	Regular		51	63	70
	Boa		35	47	55
Arbustos do deserto	Deficiente	63	77	85	88
	Regular	55	72	81	86
	Boa	49	68	79	84

1/ Condição média de escoamento e Ia = 0,2.S.

2/ Deficiente: < 30% da superfície do solo está coberta (liteira, gramíneas, e arbustos sobre os dosséis).

Regular: 30 a 70% da superfície do solo está coberta.

Boa: > 70% da superfície do solo está coberta.

3/ CNs para o grupo A foram desenvolvidos apenas arbustos do deserto.

Tabela 2.5. CN para cana-de-açúcar no Havai<sup>1/</sup>. Fonte: NRCS (2004a).

Cobertura e tratamento <sup>2/</sup>	CN para o grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Cana-de-açúcar:				
Cobertura limitada, plantio em linha reta	67	78	85	89
Cobertura parcial, plantio em linha reta	49	69	79	84
Cobertura completa, plantio em linha reta	39	61	74	80
Cobertura limitada, plantio em contorno	65	75	82	86
Cobertura parcial, plantio em contorno	25	59	75	83
Cobertura completa, plantio em contorno	6	35	70	79

1/ Condição média de escoamento e Ia = 0,2.S.

2/ Grau de cobertura:

Limitada: cana plantada recentemente, ou brotada com um sistema de raízes limitado; o dossel cobre menos da metade da área.

Parcial: a cana no período de transição entre cobertura limitada e completa; o dossel cobre de metade a quase toda a área.

Completa: cana do estágio de crescimento que fornece uma cobertura completa até o estágio de colheita.

Plantio em linha reta é o plantio morro abaixo ou oblíquo a declividades maiores do que 2%.

Plantio em contorno é o que acompanha as curvas de nível do terreno ou plantios oblíquos a declividades menores do que 2%.





CN para as condições I, II e III. A AMC II representava as condições médias da bacia e as AMC I e AMC III as condições seca e úmida, respectivamente. Essas equivalências foram verificadas por Hjelmfelt et al. (1982) que trataram o CN como uma variável aleatória e as AMC I e AMC III como as envoltórias da distribuição da relação chuva-escoamento definida pela Equação 2.9. Assumindo que  $S$  segue a distribuição log-normal, valores para 10%, 50% e 90% de probabilidade acumulada foram determinados e transformados para CN. Aplicando esse critério a sete bacias e seis parcelas experimentais, os autores verificaram que as probabilidades acumuladas de 10%, 50% e 90% correspondem respectivamente a AMC I, AMC II e AMC III com boa aproximação, como pode ser observado na Figura 2.4.

Tabela 2.7. Classes de umidade antecedente definidas pela chuva antecedente. Fonte: SCS(1972).

Condição	----- Chuva acumulada nos cinco dias antecedentes (mm) -----	
	Estação dormente	Estação de desenvolvimento
I	< 12,7	< 35,6
II	12,7 - 27,9	35,6 - 53,3
III	> 27,9	> 53,3

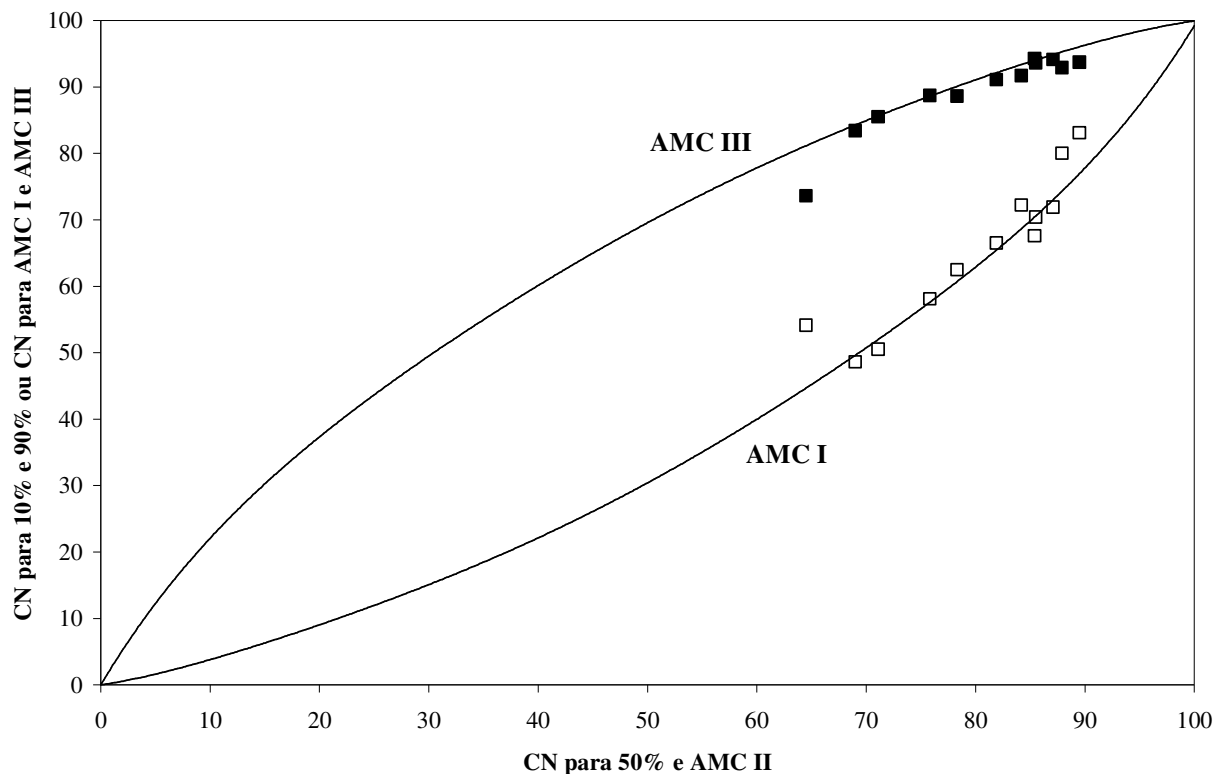


Figura 2.4. Comparação dos CNs para 10% e 90% de frequência de excedência com aqueles para AMC I e AMC III publicados pelo SCS (1972). Fonte: Hjelmfelt et al. (1982).

Segundo Hawkins et al. (2009) o SCS reconheceu que os critérios baseados na chuva antecedente, aqui apresentados na Tabela 2.7, eram para condições específicas de certas bacias no Estado do Texas, e não eram representativos das condições encontradas em todo o país. Reconheceu-se que muitos fatores adicionais tanto ao evento como a bacia poderiam também impactar o escoamento superficial. Além da chuva antecedente, estes podem incluir o estágio de crescimento das plantas, intensidade da chuva, duração e distribuição do evento, mudança na cobertura da terra, encrostamento superficial do solo, umidade antecedente, ou outro fator ou alguma combinação de fatores. Por esse motivo o SCS eliminou as definições apresentadas na Tabela 2.7 a partir da versão de 1993 do NEH. Embora o uso dos critérios da chuva antecedente esteja abolido, eles ainda são usados na prática.

Com a eliminação das definições baseada na chuva antecedente, a terminologia mudou para Condição de Escoamento Antecedente (ARC, sigla em inglês). Esta mudança foi feita para permitir que a condição média seja por definição diferente de local para local, e seja uma função do clima, do solo, da vegetação e do uso da terra. Com isso, a ARC II é reafirmada como as condições médias que antecedem uma cheia anual, sendo ela a tendência central da relação chuva-escoamento para todas as condições possíveis (HAWKINS et al, 2009). Por esse motivo, em geral, as Tabelas do CN foram desenvolvidas para a ARC II, cujos valores ficaram definidos como o CN de referência, ou seja, aqueles que ocorrem com cheias anuais e que são a base para situações de projeto.

#### **2.1.4. Efeito do uso da terra sobre o CN**

O efeito do uso da terra sobre o CN pode ser avaliado a partir da resposta hidrológica de uma bacia onde todas as outras variáveis do método do CN (tipo de solo, densidade e tipo de cobertura e manejo da terra) permanecem constantes.

Rietz (1999) e Rietz e Hawkins (2000) estudaram o efeito do uso da terra sobre o CN nas escalas bacia, regional e nacional. Da avaliação dentro da bacia, os autores encontraram que pastagens protegidas do pastoreio apresentam os menores valores do CN (16 das 19 bacias

estudadas) enquanto que para as pastagens foram encontrados CNs da ordem de 6 a 8 vezes maiores do que todos os demais usos (milho, algodão, soja, sorgo, alfafa, trigo, aveia). Também verificaram que os CNs para as culturas do milho, algodão, soja e sorgo as classificaram como “cultivos em linha” enquanto que as culturas do trigo e da alfafa se enquadraram na classe de uso “pequenos grãos”. A hipótese de que os “cultivos em linha” apresentavam maiores valores para o CN do que os “pequenos grãos” foi confirmada em 68 % das 44 bacias que apresentavam ambas as classes. Contudo, esperavam-se valores similares para o CN dentro da mesma bacia tanto para “cultivos em linha” como para “pequenos grãos”, mas isso não ocorreu. Em geral, as magnitudes e a classificação dos CNs médios concordaram com os valores tabelados do CN em escala nacional. Os CNs em ordem crescente de magnitude foram produzidos pelos usos floresta, prado, pastagem, algodão, milho, sorgo, trigo, aveia e arbustos do deserto. Cabe ressaltar que em nenhuma dessas comparações foram considerados os grupos hidrológicos ou qualquer outro parâmetro do solo.

### **2.1.5. Efeito da chuva sobre o CN**

O Método do CN é um modelo simples desenvolvido a partir de eventos totais e não possui uma expressão que permita considerar, além da altura pluviométrica total, a distribuição temporal da chuva. O procedimento apresentado no NEH (SCS, 1972; NRCS, 2004b) para calcular os incrementos da chuva excedente é similar ao sugerido por Linsley et al. (1949) para uso das relações coaxiais do escoamento, as quais também foram desenvolvidas para eventos totais.

Da análise de dados observados fica praticamente evidente que o CN é uma função de P, ocorrendo na maioria dos casos estudados com amostras de tamanho razoável. Isso não é tão surpreendente visto a natureza do método, ou seja, desenvolvido a partir de totais. Segundo Hawkins et al. (2009) as influências de fatores específicos da chuva são difíceis de isolar, uma vez que eles estão inter-relacionados, ou seja, por definição, intensidade é a altura pluviométrica por unidade de tempo, a qual varia durante o evento. Enquanto a distribuição temporal da chuva

não afeta o escoamento total com o método do CN, ela afeta os escoamentos incrementais (i.e., chuva excedente), afetando assim os hidrogramas de saída dela derivados.

Alguns estudos procuraram relacionar os efeitos das características da chuva sobre o CN. Van Mullen (1997, apud HAWKINS et al., 2009) mostrou uma relação negativa entre os CNs e as durações da chuva para locais em Ohio, Nebraska e Arizona. Também encontrou uma relação positiva entre o CN e a intensidade da chuva. Por outro lado, Hawkins e Ver Weire (2005) encontraram relações negativas entre intensidades medidas da chuva e os desvios do escoamento estimado com o CN de referência. Hawkins (1998) verificou efeitos dispersos da distribuição e da intensidade da chuva, sendo ambos negativos e positivos, não podendo chegar a uma relação conclusiva. Segundo Hawkins et al. (2009) estas anomalias e diferenças podem talvez ser reconciliadas pelas interrelações entre a duração, volume e intensidade do evento.

Tais resultados mostram que é difícil isolar os efeitos da chuva e que além deles existem também outros efeitos tais como o do solo e da cobertura da terra, os quais podem talvez alterar os efeitos das características da chuva, uma vez que a maioria dos dados foram coletados sem um controle experimental para este tipo de avaliação, ou seja, a maioria dos dados usados na análises pertenciam a diferentes complexos hidrológicos.

### **2.1.6. Efeito da área de drenagem sobre o CN**

Poucos estudos foram realizados sobre o efeito da área de drenagem estão restritos a regiões áridas e semi-áridas. Em geral todos eles mostram que o CN diminui com a área da bacia. Simanton et al. (1996) e Hildeberto Jr. et al. (2001) encontram relações do tipo  $CN = K.A^{-B}$ , sendo A a área de drenagem, K e B coeficientes de ajuste. Simanton et al. (1996) encontrou uma relação linear para a bacia de Walnut Gulch, Arizona, cuja relação foi  $CN = 84,7 - 0,022.A$ , com A em hectares e  $r^2=0,50$ . O estudo envolveu 18 bacias com área variando de 0,00069 a 785 hectares. Segundo Simanton et al. (1996), a redução do CN com a área da bacia pode estar relacionada com a distribuição espacial da chuva e com a abstração do escoamento em canais efêmeros cujos leitos são de aluviões permeáveis.

### 2.1.7. Abstração inicial ( $I_a$ ) e sua relação com a retenção potencial máxima ( $S$ )

A abstração inicial pode ser entendida como a quantidade da chuva necessária para iniciar o escoamento superficial. Dados observados mostram sua existência, mas não indicam uma relação simples para sua estimativa. Por esse motivo,  $I_a$  foi expressa como uma simples fração da retenção potencial máxima,  $S$ , simplificando a equação do método do CN e sua aplicação. Além disso, as primeiras versões do método do CN afirmavam que a retenção potencial máxima,  $S$ , incluía a abstração inicial,  $I_a$ , e que a perda máxima possível  $P - Q$  (ou  $F + I_a$ )  $\rightarrow S$  quando  $P \rightarrow \infty$ . Diversos trabalhos mostraram que essa suposição não é verdadeira (HAWKINS, 1978; HAWKINS, 1979; HAWKINS, 1983; HJELMFELT, 1991) e que há problemas conceituais no desenvolvimento da equação ou erro de cálculo (CHEN, 1982). Isso foi reconhecido e a definição alterada. Assim, a perda máxima possível é dada por  $S + I_a$ , que pode ser demonstrada notando que a perda é dada pela diferença entre a chuva total e o escoamento total ( $P - Q$ ). Substituindo  $Q$  na Equação 2.6, tem-se que:

$$F = P - I_a - \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} = \frac{(P - I_a) \cdot S}{(P - I_a) + S} \quad (2.12)$$

Multiplicando ambos os termos do lado direito da Equação 2.12 por  $P/P$  obtém-se:

$$F = \frac{\left(1 - \frac{I_a}{P}\right) \cdot S}{1 - \frac{I_a}{P} + \frac{S}{P}} \quad (2.13)$$

Lembrando que  $F + I_a = P - Q = \text{Perdas}$ , tem-se que

$$\text{Perdas} = F + I_a = \frac{\left(1 - \frac{I_a}{P}\right) \cdot S}{1 - \frac{I_a}{P} + \frac{S}{P}} + I_a \quad (2.14)$$

Como pode ser observado na Equação 2.14,  $F + I_a$  (= perdas) aproxima-se de  $S + I_a$  quando  $P \rightarrow \infty$ , ou  $1,2S$  com a afirmação do NRCS. Isso significa que o parâmetro  $F$  é a retenção efetiva para um evento após o escoamento iniciar, enquanto que a retenção efetiva total é dada pela soma de  $F$  e  $I_a$ .

Segundo Hawkins et al. (2009), pouca informação está disponível sobre a técnica usada para determinar  $I_a$  e  $S$ , sobre a quantidade e o tipo de bacias, sobre o número e a magnitude dos eventos, ambos usados no desenvolvimento da relação entre elas (Equação 2.8). A análise dos 112 pontos (Figura 2.2) feita pelos autores usando o método dos mínimos quadrados revelou um ajuste ruim entre  $I_a$  e  $S$ :

$$I_a = 0,111 \cdot S \quad r^2 = -0,0975 \quad SE = 0,48 \text{ pol} \quad (2.15)$$

Neste caso, o ajuste de uma relação linear com intercepto nulo piorou a estimativa de  $I_a$  com relação ao valor médio. A fixação da abstração inicial em 20% da retenção potencial máxima é um tanto vaga (HAWKINS et al., 2009) e tem sido objeto de críticas. Segundo Ponce e Hawkins (1996), valores de  $I_a / S$  variando de 0 a 0,3 foram documentados para vários locais do Estados Unidos. Chen (1976) questionou a razão universal e sugeriu o símbolo  $\lambda$  como uma generalização para a razão  $I_a / S$ . Cazier e Hawkins (1984) usando dados publicados de 109 pequenas bacias nos EUA e o método dos mínimos quadrados verificaram que  $\lambda = 0$  era o valor mais comum, com média de 0,0006. Schoroeder (1994) utilizando dados de chuvas simuladas em áreas de atividade mineira em recuperação encontrou que  $\lambda = 0,13$  representou melhor os dados. Jiang (2001) realizou uma grande investigação do valor de  $\lambda$ . Usou a análise de eventos (chuvas e hidrogramas individuais) e modelo de ajuste sendo  $\lambda$  e  $S$  os dois parâmetros a serem calibrados. Dessa análise,  $\lambda = 0,05$  pareceu ser mais apropriado para aplicações gerais, o qual foi testado com dados originais, apresentando melhor resultado (menor erro médio) em 252 dos 307 casos estudados do que com  $\lambda = 0,2$ . No Brasil, Mello et al. (2003) encontraram  $\lambda$  variando de 0 a 0,08 com valor médio de 0,02 para uma bacia no Estado de Minas Gerais.

Nota-se, então, que  $\lambda = 0,2$  não é universal, mas com ele fixado foi possível desenvolver o CN para várias condições experimentais. Se  $\lambda$  fosse assumido para variar, não seria possível tal parametrização. Contudo, o estudo de Jiang (2001) revelou que  $\lambda = 0,05$  representa melhor a realidade apresentada pelos dados observados. Caso este valor venha a ser adotado como padrão, uma nova tabela para os valores do CN deverá ser desenvolvida. Além disso, haverá impactos na estimativa da chuva excedente e no hidrograma resultante quando comparado com o modelo tradicional, isto é,  $\lambda = 0,2$ .

Jiang (2001) e Hawkins et al. (2002) apresentam relações de equivalência entre os parâmetros (CN e  $S$ ) para  $\lambda = 0,05$  e  $\lambda = 0,2$ :

$$S_{0,05} = 1,33 \cdot S_{0,2}^{1,15} \quad (2.16)$$

sendo  $S_{0,05}$  e  $S_{0,2}$  a retenção potencial máxima em polegadas para  $\lambda = 0,05$  e  $\lambda = 0,2$ , respectivamente.

$$CN_{0,05} = \frac{100}{1,879 \cdot \left( \frac{100}{CN_{0,2}} - 1 \right)^{1,15} + 1} \quad (2.17)$$

sendo  $CN_{0,05}$  e  $CN_{0,2}$  o número da curva de escoamento direto para  $\lambda = 0,05$  e  $\lambda = 0,2$ , respectivamente.

A Tabela 2.8 mostra os correspondentes CNs para os dois valores de  $\lambda$  e o valor da chuva crítica ( $P_c$ ), ou seja, o valor da chuva total para a qual os dois modelos apresentam o mesmo resultado. Para chuvas maiores que  $P_c$ , o uso de  $\lambda = 0,2$  resulta em maior escoamento calculado do que com  $\lambda = 0,05$  e o contrário ocorre para chuvas menores que  $P_c$ . Estas diferenças são mais pronunciadas para baixos valores do CN e para pequenas chuvas (HAWKINS et al., 2002). Estas tendências também são observadas nos hidrogramas resultantes.



Tabela 2.8. Correspondências entre CNs,  $I_a$  e Pc (Hawkins et al., 2002).

CN <sub>0,2</sub>	$\lambda = 0,2$		$\lambda = 0,05$			Pc (mm)
	$S_{0,2}$ (mm)	$I_a$ (mm)	CN <sub>0,05</sub>	$S_{0,05}$ (mm)	$I_a$ (mm)	
100	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	---
95	13,4	2,7	94,0	16,2	0,8	62,0
90	28,2	5,6	87,0	38,1	1,9	43,7
85	44,8	9,0	79,6	64,9	3,3	49,5
80	63,5	12,7	72,4	96,9	4,8	57,7
70	108,9	21,8	58,5	180,1	9,0	66,8
65	136,8	27,4	52,0	234,2	11,7	77,5
60	169,3	33,9	45,9	299,4	15,0	102,6
55	207,8	41,6	40,1	378,8	18,9	114,6
50	254,0	50,8	34,7	477,2	23,9	135,9
45	310,4	62,1	29,7	600,9	30,1	156,2
40	381,0	76,2	25,0	760,8	38,0	181,1
35	471,7	94,3	20,7	972,5	48,6	212,1
30	592,7	118,5	16,7	1264,2	63,2	252,0
25	762,0	152,4	13,1	1687,9	84,4	305,3
20	1016,0	203,2	9,8	2351,1	117,6	382,0
15	1439,3	287,9	6,8	3509,0	175,5	503,2
10	2286,0	457,2	4,1	5971,5	298,6	---
5	4826,0	965,2	1,8	14096,3	704,8	---

### 2.1.8. Sensibilidade

Estudos têm mostrado que o escoamento direto calculado pela Equação 2.9 é mais sensível ao parâmetro CN do que à chuva. Hawkins (1975) fez uma análise numérica do método do CN considerando erros arbitrados de  $\pm 10\%$  e verificou que esta conclusão é válida para valores de precipitação menores do que 230 mm. Os resultados de Chen (1982) levaram a mesma conclusão. Além disso, quanto mais próximo de  $0,2S$  for a chuva, maior será o erro no cálculo do escoamento. Da mesma maneira, quanto mais próximo for o CN de seu valor limite para uma dada precipitação, ou seja,  $CN \rightarrow CNo = 100/(1 + P/50,8)$ , maior será o erro no cálculo do escoamento. Bondelid et al. (1982), usando o TR55 (SCS, 1986), chegaram à mesma conclusão e estenderam a análise para os picos de cheia. Mesmo em modelos mais complexos com

propagação de cheia em canal, o CN tem dominado a importância sobre a chuva e o coeficiente de rugosidade de Manning (Hawkins, 1997 apud HAWKINS et al., 2009).

## **2.2. Classificação Hidrológica de Solos**

As propriedades do solo exercem grande influência no processo de geração do escoamento superficial. Suas características variam espacialmente, inclusive para o mesmo tipo de solo. No entanto, diferentes tipos de solos podem influenciar, de acordo com a combinação de suas propriedades, de modo similar no processo de geração do escoamento superficial.

Uma classificação consiste em agrupar objetos segundo a similaridade de suas qualidades para um determinado objetivo ou finalidade. Na hidrologia, uma classificação de solo tem por objetivo representar a influência das propriedades do solo no processo de geração do escoamento superficial. Com essa finalidade, os solos podem ser classificados de acordo com suas propriedades que condicionam os processos hidrológicos se consideradas independentemente da cobertura e da declividade da bacia. Seguindo este raciocínio, foi desenvolvida a classificação hidrológica de solos que é usada com o método do CN.

### **2.2.1. Definição dos grupos hidrológicos de solos**

Com o método do CN as propriedades do solo que governam seu comportamento hidrológico são expressas como Grupos Hidrológicos de Solo, os quais foram inicialmente propostos por Musgrave (1955) para estimativa da infiltração. Neste pioneiro trabalho, Musgrave (1955) analisou vários dados de infiltração, sendo a maioria resultado de testes de infiltrômetros que não se resumiam a um único tipo de aparelho, mas realizados para complexos hidrológicos bem definidos, permitindo assim fazer comparações relativas. A base de comparação foi à capacidade mínima de infiltração, ou seja, a taxa mínima de infiltração razoavelmente constante, a qual representa a condição de um dado complexo hidrológico completamente molhado por

chuvas antecedentes. A Figura 2.5 mostra o resultado desta análise. As características gerais dos solos, observadas por Musgrave (1955), foram por ele descritas para cada grupo hidrológico:

Grupo A : inclui as areias profundas e siltes bem agregados e profundos de origem eólica, ambos muito permeáveis e contendo pouco teor de argila e de colóides. Os siltes têm suficiente teor de matéria orgânica para proporcionar boa agregação.

Grupo B : inclui solos arenosos e franco siltosos de moderada profundidade e com infiltração acima da média. A capacidade mínima de infiltração para este grupo varia de 3,81 a 7,62 mm/h.

Grupo C : inclui solos rasos de todas as classes texturais. Suas capacidades mínimas de infiltração estão abaixo da média (1,27 a 3,81 mm/h).

Grupo D : inclui solos com elevadas taxas de expansão na superfície ou na subsuperfície por causa do elevado teor de argila ou colóide. Suas capacidades mínimas de infiltração aproximam-se de 1,27 mm/h.

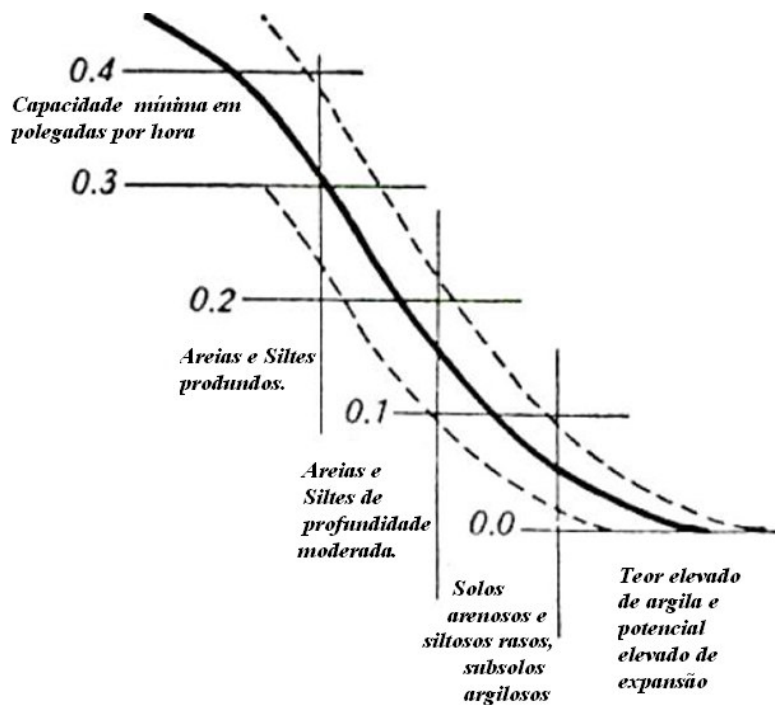


Figura 2.5. Variação das capacidades mínimas de infiltração para cultivo em linha sobre solos úmidos. A variação devido ao tratamento anterior é representada pela linha tracejada próxima a média. Fonte: Musgrave (1955).

A classificação hidrológica de solos, assim definida, foi incorporada ao método do CN com uma leve modificação no texto de suas características gerais, provavelmente para incluir outras características de solos que não estavam presentes no conjunto de dados analisados por Musgrave (1955). Portanto, a classificação hidrológica de solos publicada com o método do CN (SCS, 1972), conhecida mundialmente e talvez aplicada sem qualquer adaptação local, define os grupos hidrológicos:

Grupo A — Solos com baixo potencial de escoamento superficial e taxas elevadas de infiltração mesmo quando completamente molhados. Consistem essencialmente de areias e cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados e com taxa elevada de transmissão de água.

Grupo B — Solos com taxas moderadas de infiltração quando completamente molhados. São solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa. Estes solos têm uma taxa moderada de transmissão de água.

Grupo C — Solos com baixas taxas de infiltração quando completamente molhados, e consistem essencialmente de solos com uma camada que impede o movimento da água para baixo e de solos com textura moderadamente fina a fina. Estes solos têm baixa taxa de transmissão de água.

Grupo D — Solos com potencial elevado de escoamento. Eles têm baixas taxas de infiltração quando completamente molhados e consistem essencialmente de solos argilosos com elevado potencial de expansão, solos com um lençol subterrâneo permanentemente elevado, solos com uma densa camada de argila ou camada de argila na superfície ou próxima dela, e solos rasos sobre material quase impermeável. Estes solos têm uma taxa de transmissão de água muito baixa.

Na definição dos grupos hidrológicos (MUSGRAVE, 1955; SCS, 1972) nenhum critério para a classificação de um solo é apresentada além da taxa mínima de infiltração. Isso dificulta sua aplicação consistente quando não se dispõe de medições de infiltração.

Uma publicação posterior (SCS, 1986) fornece um critério simples para associar solos aos grupos hidrológicos. Baseados somente na textura, eles foram propostos por Brakensiek e Rawls (1983):

Grupo A: Areia, Areia franca ou Franco arenoso;

Grupo B: Franco ou Franco siltoso;

Grupo C: Franco argilo arenoso;

Grupo D: Franco argiloso, Franco argilo siltoso, Argila arenosa, Argila siltosa ou Argila.

A classe textural Silte está faltando nesta classificação simplificada, mas quando as informações são dispostas sobre o triângulo textural (Figura 2.6), observa-se que ela é uma extensão do grupo hidrológico B.

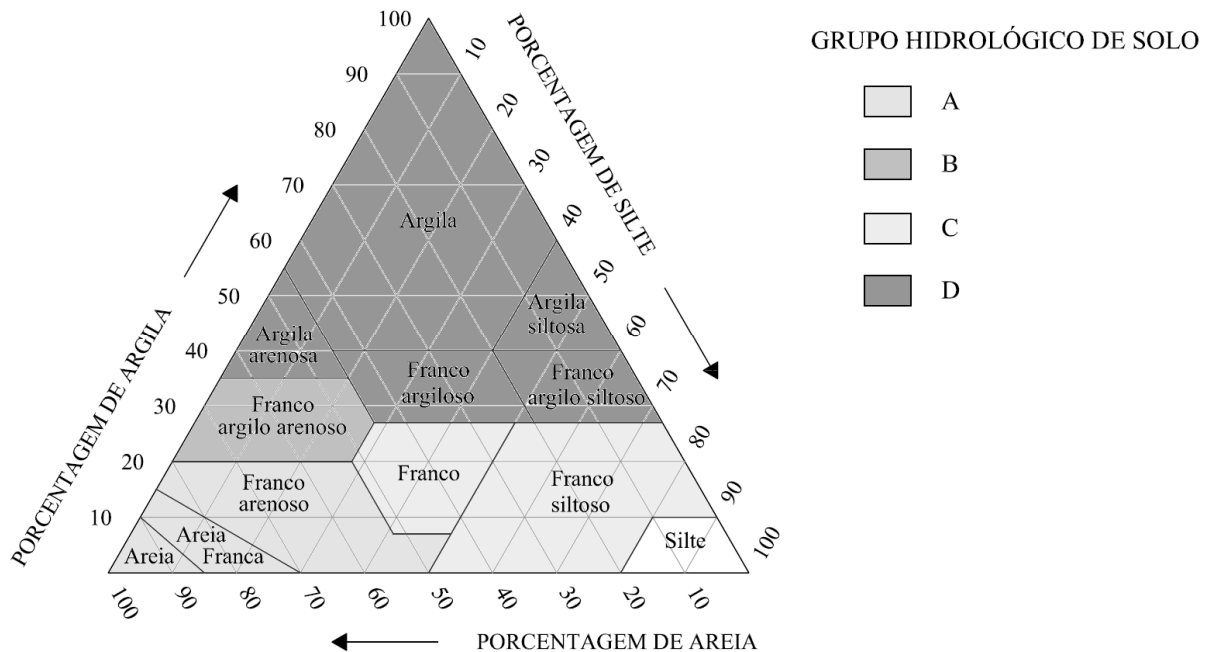


Figura 2.6. Grupos Hidrológicos de Solos definidos pela classe textural. Fonte: Adaptada de Brakensiek e Rawls (1983).

Na ausência de outros critérios, o baseado na textura acaba sendo adotado pelo usuário do método para classificar um solo hidrológicamente. Isso causa problemas para classificar solos com textura variável ao longo do perfil porque a maioria dos usuários não considera os diferentes horizontes do solo, resultando numa classificação baseada apenas na textura superficial do solo. Além disso, somente a textura não é capaz de refletir as condições de infiltrabilidade de alguns solos, principalmente os argilosos bastante intemperizados.

A atual revisão da classificação hidrológica de solos minimiza a questão da subjetividade quando as características gerais de cada grupo são usadas como guia de classificação. No entanto, elas refletem bem as características dos solos da região para a qual ela foi desenvolvida. Os critérios de classificação, apresentados na Tabela 2.9, são quantitativos e bem definidos. Baseiam-se na condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) da camada menos permeável, na profundidade da camada impermeável e na profundidade do lençol d'água subterrâneo. As características gerais de cada grupo são:

Grupo A — Solos neste grupo têm baixo potencial de escoamento superficial quando completamente molhados. Água é transmitida livremente através do solo, isto é, permeabilidade elevada. Estes solos tipicamente possuem menos do que 10 % de argila e mais do que 90 % de areia ou cascalho. Alguns solos pertencentes às classes texturais areia franca, franco arenoso, franco, ou franco siltoso são possíveis de serem incluídos neste grupo se eles forem bem agregados, de baixa densidade, ou se contiverem mais do que 35 % de fragmentos rochosos.

Grupo B — Solos neste grupo têm potencial moderadamente baixo de escoamento superficial quando completamente molhados. A transmissão de água através do solo não é impedida, isto é, permeabilidade moderadamente alta. Solos do grupo B têm tipicamente 10 a 20 % de argila e 50 a 90 % de areia. São de textura areia franca ou franco arenoso. Alguns solos pertencentes às classes texturais franco, franco siltoso, silte, ou franco argilo arenoso podem ser incluídos neste grupo se eles forem bem agregados, de baixa densidade, ou se contiverem mais do que 35 % de fragmentos rochosos.

Grupo C — Solos neste grupo têm potencial moderadamente elevado de escoamento superficial quando completamente molhados. A transmissão de água através do solo é um pouco restrita, isto é, permeabilidade moderadamente baixa. Solos do grupo C têm tipicamente 20 a 40 % de argila e menos de 50 % de areia. São de textura franco, franco siltoso, franco argilo arenoso, franco argiloso, e franco argilo siltoso. Alguns solos pertencentes às classes texturais argila, argila siltosa, ou argila arenosa podem ser incluídos neste grupo se eles forem bem agregados, de baixa densidade, ou se contiverem mais do que 35 % de fragmentos rochosos.

Grupo D — Solos neste grupo têm potencial elevado de escoamento superficial quando completamente molhados. A transmissão de água através do solo é restrita ou muito restrita, isto é, permeabilidade baixa ou muito baixa. Solos do grupo D têm tipicamente mais de 40 % de argila e menos de 50 % de areia e possuem textura argilosa. Em algumas áreas, eles podem também ter elevado potencial de contração-expansão. Todos os solos com profundidade a uma camada restritiva menor do que 50 cm e todos os solos com lençol subterrâneo dentro dos primeiros 60 cm de profundidade estão neste grupo.

Grupo hidrológico duplo — Existem solos classificados no grupo D baseado somente na presença de lençol d'água subterrâneo dentro de 60 cm de profundidade. Grupos hidrológicos duplos (A/D, B/D, e C/D) são atribuídos aos solos encharcados que possam ser adequadamente drenados. A primeira letra se aplica às condições após drenagem, de acordo com os critérios apresentados na Tabela 2.9, e a segunda letra se aplica à condição natural não drenada.

Tabela 2.9. Critérios para classificação hidrológica de solos (NRCS, 2007).

<b>Profundidade da camada impermeável (cm)</b>	<b>Condição</b>	<b>Profundidade do lençol subterrâneo (cm)</b>	<b>Condição</b>	<b>Ks da camada menos permeável (µm/s)</b>	<b>GHS</b>
< 50 cm	----	----	----	----	D
50 a 100 cm	E	< 60 cm	E	> 40,0	A/D
				> 10,0 a ≤ 40,0	B/D
				> 1,0 a ≤ 10,0	C/D
				≤ 1,0	D
> 100 cm	E	< 60 cm	E	> 10,0	A/D
				> 4,0 a ≤ 10,0	B/D
				> 0,4 a ≤ 4,0	C/D
				≤ 0,4	D
50 a 100 cm	OU	60 a 100 cm	E	> 40,0	A
				> 10,0 a ≤ 40,0	B
				> 1,0 a ≤ 10,0	C
				≤ 1,0	D
> 100 cm	OU	> 100 cm	E	> 10,0	A
				> 4,0 a ≤ 10,0	B
				> 0,4 a ≤ 4,0	C
				≤ 0,4	D

Como pode ser observado, as principais melhorias da atualização da classificação hidrológica de solo com relação às versões anteriores (SCS, 1972; SCS, 1986) estão nas descrições gerais dos grupos hidrológicos e nas definições dos critérios apresentados na Tabela 2.9, as quais são:

- definição da amplitude da condutividade hidráulica saturada da camada menos permeável em função da profundidade da camada impermeável para cada grupo hidrológico;
- definição das porcentagens de argila e areia para cada grupo hidrológico, não mencionando apenas “solos arenosos profundos” ou “solos arenosos menos profundos” como publicado nas versões anteriores do “National Engineering Handbook”;
- alerta sobre a possibilidade de indicar um solo de textura mais fina para um grupo hidrológico com menor potencial de escoamento desde que este solo possua características que lhe proporcionem uma melhor condição de drenagem interna quando comparado com outro solo de mesma textura ou de textura mais grossa.

Com relação à primeira melhoria citada, cabe dizer que a metodologia para se chegar aos valores mostrados na Tabela 2.9 não é apresentada. Estes valores podem ter sido baseados em análises de dados experimentais cujas referências básicas podem ser Rawls e Brakensiek (1983) e Brakensiek e Rawls (1983). Em geral os critérios propostos são consistentes e livres de interpretações subjetivas.

A indicação de porcentagens de areia e argila, teores que em geral foram encontrados nos solos pertencentes aos grupos hidrológicos, também diminui a questão da subjetividade da classificação na ausência de informações sobre condutividade hidráulica saturada de solos. Contudo, a terceira melhoria alerta que somente a textura não é suficiente para classificar um solo, e que outros atributos também deveriam ser analisados antes da indicação final. Portanto, pode-se dizer que a classificação hidrológica de solos revisada do NRCS (2007) é clara, objetiva e consistente.



## 2.2.2. Pesquisas realizadas nos EUA

Desde que a classificação hidrológica de solos foi desenvolvida, poucos estudos foram feitos no sentido de avaliar criticamente as definições dos grupos hidrológicos como usados no Método do CN ou validando as capacidades mínimas de infiltração propostas por Musgrave (1955).

No estabelecimento dos grupos hidrológicos, as propriedades dominantes do solo foram associadas com a capacidade mínima de infiltração. Uma variedade de propostas de conexão foi sugerida, como apresentado na Tabela 2.10. A maioria dos valores propostos está acima dos valores apresentados por Musgrave (1955), os quais foram medidos no horizonte B sob prolongado umedecimento, na condição de solo nu e para situações agrícolas. As outras propostas não apresentam informações sobre as medições de campo, a fonte dos dados, ou as condições que levaram aos valores apresentados (HAWKINS, 1980). Como ensaios realizados com diferentes equipamentos para as mesmas condições ou ensaios conduzidos sob diferentes condições e mesmos equipamentos apresentam resultados divergentes, não é possível comparar ou tirar conclusões sobre esses valores.

Tabela 2.10. Capacidades mínimas de infiltração em milímetros por hora para os grupos hidrológicos de solos. Fonte: Hawkins (1980).

Fonte	D	C	B	A	Observação
Musgrave (1955)	< 1,27	1,27 - 3,81	3,81-7,62	> 7,62	Máximo: 11,4
SCS (1972)	< 5,08	5,08 - 20,32	20,32-127,00	> 127,00	
Leven e Stender (1967)	< 20,32	20,32-63,50	63,50-127,00	> 127,00	
USFS (sem data)	< 12,70	12,70-31,75	31,75-76,20	> 76,20	
Miller et al. (1973)	< 2,03	2,03- 3,81	3,81-7,62	> 7,62	Mínimo: 0,5 Máximo: 11,4
Estgate (1977)	< 4,57	4,57- 9,91	9,91-29,97	> 29,97	
Musgrave (1973)	< 6,82	6,82- 14,56	14,56-30,99	> 30,99	Máximo: 31,0
Terstriep e Stall (1974)	2,54	6,35	12,7	25,4	

Brakensiek e Rawls (1983) apresentam uma simplificação da classificação hidrológica de solo, estabelecendo uma relação entre os grupos hidrológicos de solo (Musgrave, 1955) e as classes texturais do solo USDA (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993). Eles assumiram que a condutividade hidráulica saturada correspondia à capacidade mínima de infiltração depois de prolongado suprimento de água, isto é, depois de prolongado umedecimento. As condutividades hidráulicas saturada, obtidas de estudos anteriores e definidas para cada classe textural, foram relacionadas com as capacidades mínimas de infiltração e usadas para delinear os grupos hidrológicos. No entanto, é importante esclarecer que as classes texturais não são tipos de solo, mas dão uma idéia da distribuição de partículas, indicando a natureza geral das propriedades físicas do solo. Por exemplo, as classes texturais Areia e Areia franca são dominadas pelas propriedades da areia, enquanto que Argila siltosa é dominada pelas propriedades da argila. Além disso, diferentes classes texturais podem estar presentes num mesmo perfil de solo, ou seja, cada horizonte pode apresentar uma distribuição granulométrica diferente. Brakensiek e Rawls (1983) agruparam em classes texturais dados de diferentes perfis e horizontes.

A Tabela 2.11 mostra os valores médios das condutividades hidráulicas para cada classe textural e a correspondência destas classes com os grupos hidrológicos. Esta proposta de classificação foi incluída no apêndice do “Technical Release 55” (SCS, 1986) que é uma adaptação do Método do CN para aplicação em bacias urbanas.

Tabela 2.11. Grupos hidrológicos de solo e condutividade hidráulica saturada média para as classes texturais do USDA. Fonte: Adaptada de Brakensiek e Rawls (1983) e Rawls et al. (1982).

<b>Grupo Hidrológico de Solo</b>	<b>Classe Textural</b>	<b>Ks (mm/h)</b>
A	Areia	210
	Areia franca	61,1
	Franco arenoso	25,9
B	Franco	13,2
	Franco siltoso	6,8
C	Franco argilo arenoso	4,3
	Franco argiloso	2,3
	Franco argilo siltoso	1,5
D	Argila arenosa	1,2
	Argila siltosa	0,9
	Argila	0,6

Wood e Blackburn (1984) avaliaram a efetividade dos grupos hidrológicos de solos no cálculo das estimativas do escoamento superficial para as condições das savanas áridas e semiáridas dos EUA. Experimentos foram realizados em pequenas parcelas (3 x 3 pés) localizadas nos Estados de Nevada, Texas e Novo México. O escoamento medido era resultado da aplicação de chuva artificial sobre as pequenas parcelas. Os escoamentos estimados com a metodologia padrão do método do CN (SCS, 1972) foram comparados com os medidos. Em geral, o escoamento estimado foi muito maior do que o observado para todos os três grupos hidrológicos analisados (B, C e D). A causa da superestimativa do escoamento superficial foi atribuída a classificação hidrológica de solo. Segundo Wood e Blackburn (1984), os grupos hidrológicos de solos estão baseados em suposições que frequentemente não são verdadeiras para savanas áridas e semiáridas. Por exemplo, o estrato impermeável exerce pouco efeito nas taxas de infiltração e no escoamento porque a maioria das chuvas sobre estas áreas não fornecem água suficiente para percolar até onde às camadas impermeáveis são encontradas. Além disso, alguns solos nestas áreas possuem um encrostamento superficial, a qual é mais influente do que a textura e a drenagem (WOOD e BLACKBURN, 1984). Este é o caso, apresentado pelos autores, de um solo com classe textural Franco arenosa em todo o seu perfil que foi classificado como B, mas nas simulações gerou 60% de escoamento a mais do que os solos classificados como D. Como resultado, os autores sugerem abandonar ou alterar profundamente os grupos hidrológicos de solos para uso em savanas áridas e semiáridas dos EUA, e que critérios sejam desenvolvidos fazendo uso das características superficiais do solo. Cabe ressaltar que chuvas simuladas não representam o padrão de chuva de uma região. Elas são de intensidades constantes e durações fixadas. Além disso, as capacidades de infiltração, como medidas nesses ambientes, são dependentes da intensidade da chuva (HAWKINS et al., 2009).

Langan e Lammers (1991), preocupados com o problema de inconsistência da classificação hidrológica de solos (SCS, 1972), fizeram uma proposta de classificação alternativa. Eles se basearam em propriedades do solo disponíveis em levantamentos pedológicos, as quais direta ou indiretamente interferem na infiltração e, portanto, no escoamento superficial. As características usadas na classificação proposta foram, entre outras, camada restritiva e sua profundidade, textura do solo, profundidade do lençol d'água subterrâneo e classes de permeabilidade. A proposta apresentada é aparentemente consistente e pouco sujeita a

interpretações subjetivas, muito embora esteja baseada em critérios qualitativos. No entanto, a proposta apresentada ou não foi difundida ou não despertou interesse dos usuários do método por exigir conhecimentos sobre pedologia, não sendo, portanto, aplicada em projetos.

O limitado número de medições para a capacidade mínima de infiltração nos EUA e a falta de critérios objetivos para a classificação hidrológica de solos criou uma preocupação sobre o potencial erro no procedimento de classificação. A designação de solos aos grupos hidrológicos era baseada em interpretações subjetivas dos critérios ou características gerais de cada grupo hidrológico pelos cientistas de solo, não sendo consistente em diferentes regiões dos EUA (NIELSEN e HJELMFELT, 1998). Por esse motivo o NRCS revisou a classificação hidrológica de solos, propondo novos critérios de classificação e nova definição das características gerais de cada grupo hidrológico de solo. Isso mostra mais uma vez a importância de se estabelecer uma classificação hidrológica consistente e confiável e que possa ser aplicada nacionalmente sem estar sujeita a interpretações subjetivas.

### **2.2.3. Esforços brasileiros**

No Brasil, infelizmente, poucos trabalhos foram desenvolvidos sobre o tema classificação hidrológica de solos, seja para adaptá-la às condições locais, seja para avaliar a efetividade da classificação original do Método do CN e de suas adaptações. O trabalho de Setzer e Porto (1979) foi pioneiro nesta tarefa. O objetivo central do trabalho foi propor uma adaptação da classificação hidrológica do SCS para o Estado de São Paulo. Com as informações disponíveis na época (estudos geológicos e pedológicos), os autores definiram cinco grupos hidrológicos de solo para o Estado de São Paulo, cujas características principais são:

Grupo A— Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%; não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

Grupo B— Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas este limite pode subir a 20% graças a maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.

Grupo C: Solos barrentos com teor de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser 40% e 1,5 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade camada mais densificada que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

Grupo D— Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

Grupo E— Solos barrentos como C, mas com camada argilosa impermeável ou com pedras. Ou sem tal camada, mas o teor de argila supera 40%. No caso de terras roxas este teor pode subir a 60% (no caso D, 45%).

Embora o trabalho de Setzer e Porto (1979) seja uma adaptação do método do CN para aplicação no Estado de São Paulo, a definição de mais um grupo hidrológico de solo não permite o uso da tabela original de valores do CN. Portanto, uma nova tabela de valores para o CN foi estabelecida. No entanto, a tabela proposta para estimativa dos valores do CN não tem sua origem apontada. Além disso, cada um dos 41 tipos de solos usados no trabalho possui uma porcentagem de cada grupo hidrológico, ou seja, não é possível identificar a posição e o limite de cada grupo hidrológico no interior de uma bacia hidrográfica. Mesmo assim este trabalho é recomendado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo.

Lombardi Neto et al. (1989) apresentaram outra adaptação para classificação hidrológica de solos. O objetivo desta classificação foi auxiliar na estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas e no dimensionamento do espaçamento entre terraços. Os critérios de

classificação ou características gerais de cada grupo hidrológico foram baseados em trabalhos realizados no Estado de São Paulo (BRASIL, 1960; BERTONI, 1978). Na definição de cada grupo hidrológico foi incluída como critério a profundidade, a textura, a razão textural entre o horizonte superficial e subsuperficial, e a permeabilidade dos solos influenciada pela sua porosidade e pela atividade da argila.

A classificação hidrológica proposta por Lombardi Neto et al. (1989) foi avaliada e revisada por Sartori et al. (2005a, 2005b) resultando em sua adaptação para a nomenclatura do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 1999 assim como sugerida para uso no Brasil. Embora estes trabalhos sejam uma adaptação para os solos brasileiros que minimizou algumas subjetividades e inconsistências do uso da classificação original do método do CN (SCS, 1972), os critérios baseados em algumas características pedológicas ainda estão sujeitos a interpretações pessoais divergentes. Por exemplo, estas classificações não consideram a influência da profundidade da mudança textural abrupta ou de outro horizonte mais restritivo. Portanto, é evidente a necessidade de se ter uma classificação hidrológica confiável e consistente entre usuários.

### **2.3. Métodos para calibração do CN**

O método do CN foi desenvolvido para ser usado em projetos que envolvem bacias sem observações hidrológicas. O procedimento de aplicação neste caso é baseado na seleção do parâmetro CN nas tabelas de valores característicos determinados para as condições dos EUA. O uso destas tabelas é padrão, uma vez que não existam determinações locais do CN para os complexos hidrológicos encontrados. A escolha do CN para cada complexo hidrológico envolvido no projeto depende da classificação hidrológica dos solos da bacia, do tipo de cobertura e manejo da terra, e da condição hidrológica superficial do solo. No entanto, se dados de chuva e escoamento direto estiverem disponíveis para o local, é altamente recomendado o uso do CN calibrado ou de referência, uma vez que o escoamento direto calculado é mais sensível ao CN do que à chuva.

Para a calibração do CN vários métodos ao longo do tempo foram propostos e aplicados para validar os valores já determinados ou para estender a aplicação do método para outros locais, assim como para o desenvolvimento de valores de referência para novos complexos hidrológicos. A pesquisa realizada sobre o assunto revelou seis métodos que usam diretamente ou derivam da relação chuva-escoamento do método do CN para calibração de seu parâmetro, os quais são: (1) “National Engineering Handbook - NEH” (SCS, 1972); (2) Mínimos Quadrados; (3) Curva de Frequência – FM (HJELMFELT, 1980); (4)  $P/S > 0,46$  (HAWKINS et al., 1985); (5) Assintótico – AS (HAWKINS, 1993); (6) Frequência Log-Normal – LN (SCHNEIDER e MCCUEN, 2005); os quais são apresentados na seqüência.

### **2.3.1. Método do National Engineering Handbook – NEH**

Foi o método inicialmente usado para o desenvolvimento do parâmetro CN. Consistia em plotar os valores de chuva ( $P$ ) e escoamento superficial direto ( $Q$ ) no sistema cartesiano  $PQ$  com a família de curvas do parâmetro CN. O valor mediano do CN era selecionado por inspeção visual, sendo escolhido o CN que dividia os dados plotados em dois grupos iguais. Este era um procedimento gráfico usado com eventos de cheia máxima anual.

Como se pode notar, o procedimento descrito era simples, porém limitado por requerer anos de monitoramento. Como esta não era e talvez não seja a situação mais comum, pesquisadores usaram a média simples ou a mediana dos CNs definidos para cada evento de séries hidrológicas estendidas, não se resumindo a séries totais. Isto resulta em CNs que são muito maiores do que aqueles dados em tabelas (HJELMFELT, 1991).

### **2.3.2. Método dos Mínimos Quadrados – LS**

Com o avanço da tecnologia computacional o método dos mínimos quadrados passou a ser usado na calibração do parâmetro CN. Ele proporciona um fácil entendimento do problema e

fornece medidas da qualidade do ajuste, sendo talvez o mais intuitivo dos métodos. Exemplos de seu uso estão nos trabalhos de Cooley e Lane (1981), Simanton et al. (1996), entre outros.

O método dos mínimos quadrados não faz restrição ao tipo de série hidrológica a ser usada (total, parcial ou anual), como o método do NEH. Em geral todos os dados observados são usados na calibração do CN. Contudo, um limite mínimo de 25,4 mm para a chuva tem sido adotado na prática para evitar o efeito tendencioso de pequenas chuvas sobre o valor calibrado do CN, ou seja, elevados CNs (e.g., JIANG, 2001).

### **2.3.3. Método da Curva de Frequência – FM**

Desenvolvido por Hjelmfelt (1980), este método está baseado no uso mais comum do Método do CN: cálculo da vazão de projeto ( $T_r = 25$  anos, 100 anos, etc) a partir da chuva de projeto de mesmo período de retorno (Princípio da Frequência Igualada). Assim, o método trata separadamente a série de eventos de chuva e a série de eventos de escoamento superficial direto resultante.

As curvas de distribuição de frequências da chuva e do escoamento são construídas sobre um papel probabilístico log-normal. A transformação da distribuição de frequência da chuva na distribuição de frequência do escoamento é feita com a equação do Método do CN (Equação 2.9).

Em resumo, este método procura o CN que melhor reproduz a distribuição do escoamento observado a partir da distribuição da chuva observada. O valor do CN era determinado por tentativas e a escolha do melhor valor se baseava na inspeção visual do escoamento reproduzido sobre o escoamento observado, mas em um trabalho posterior (HJELMFELT, 1991) o autor verificou que a melhor estimativa para o CN é a média dos valores log-transformados do parâmetro  $S$ . Um exemplo desta metodologia é apresentado na Figura 2.8.



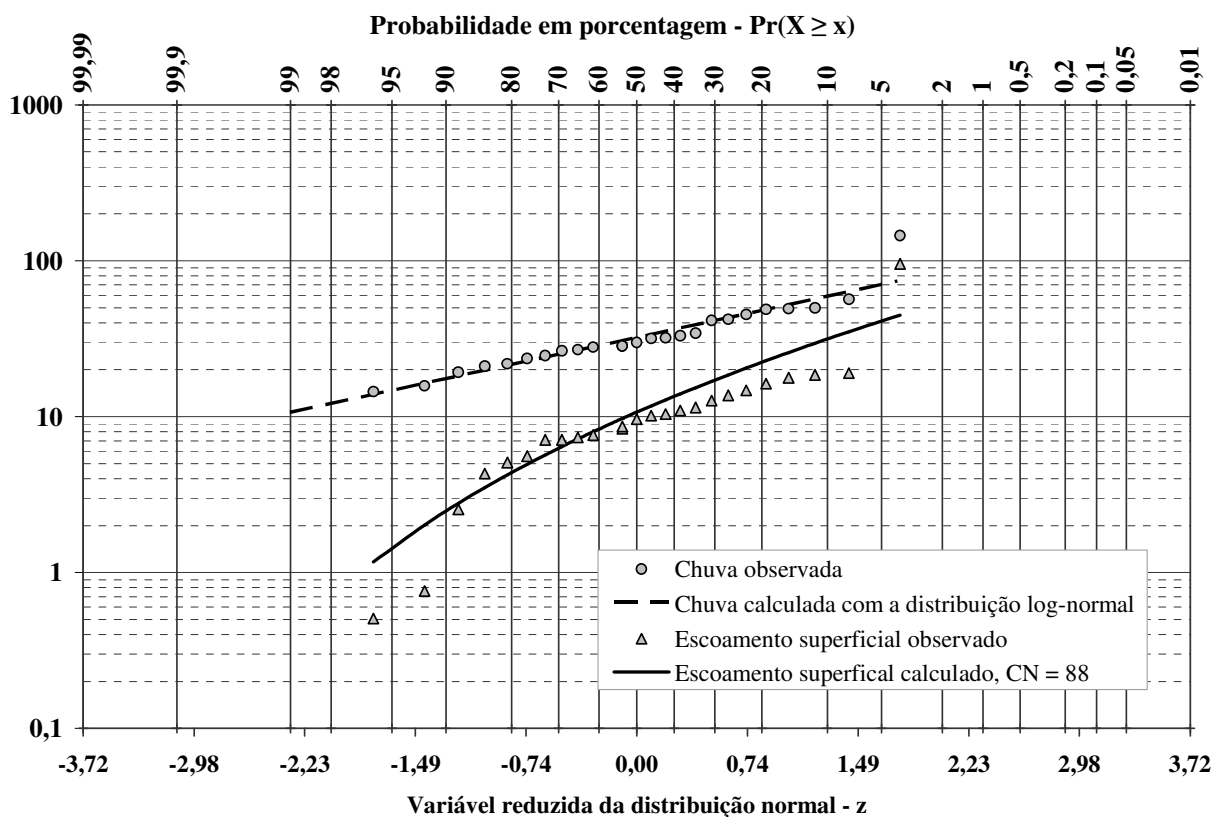


Figura 2.7. Comparação do escoamento observado com o computado usando o princípio da frequência igualada. Fonte: NRCS (2004b).

### 2.3.4. Método P/S > 0,46

Proposto por Hawkins et al. (1985), o princípio deste método está baseado na teoria de probabilidades e nos resultados de Hjelmfelt et al. (1982), que encontraram que os valores do CN para as condições de escoamento antecedente (ARC) I, II e III descrevem, respectivamente, as probabilidades acumuladas de 90%, 50% e 10% do escoamento calculado para uma dada chuva com o método do CN. Por exemplo, o escoamento calculado na ARC I tem 90% de chance de ser igualado ou ultrapassado, enquanto que o escoamento calculado na ARC III tem apenas 10%.

Usando os valores correspondentes da retenção potencial máxima ( $S$ ) para as três condições de escoamento antecedente, Hawkins et al. (1985) obtiveram as relações:

$$S_I = 2,281 \cdot S \quad (2.18)$$

$$S_{III} = 0,427 \cdot S \quad (2.19)$$

sendo  $S_I$  e  $S_{III}$  a retenção potencial máxima para as condições de escoamento I e III, respectivamente.

Na equação do método do CN tem-se que  $\lambda = I_a / S = 0,2$  é o limite abaixo do qual qualquer valor de  $P/S$  não produz escoamento e que este valor representa a condição média de escoamento. Usando as Equações 2.18 e 2.19 obtém-se os valores  $I_a / S_{III} = 0,085$  e  $I_a / S_I = 0,456$  que são os limites abaixo dos quais valores de  $P/S$  não produzem escoamento para as condições de escoamento antecedente III e I, respectivamente. Estes resultados, ilustrados na Figura 2.8, foram associados aos de Hjelmfelt et al. (1982) para definir as probabilidades do escoamento para valores de  $P/S$  e suas relações com as ARCs, as quais estão apresentadas na Tabela 2.12.

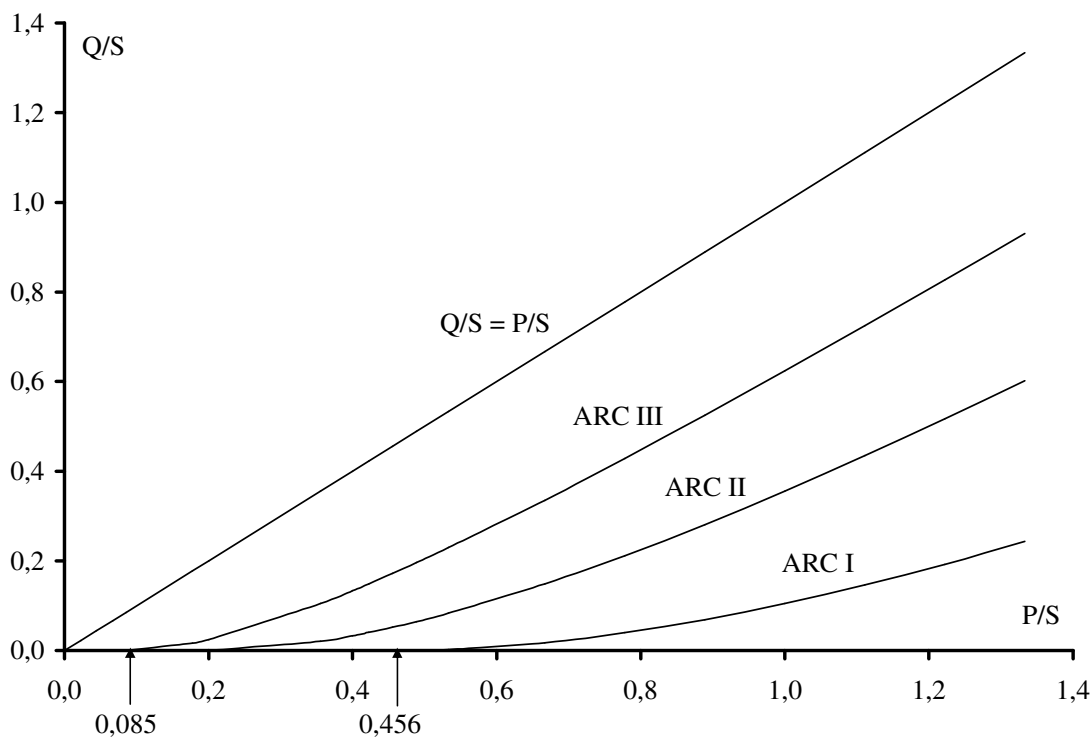


Figura 2.8. Relações entre chuva e escoamento adimensionalizadas sobre a retenção potencial máxima na ARC II. Fonte: Hawkins et al. (1985).

Tabela 2.12. Probabilidade do escoamento para P/S (HAWKINS et al., 1985).

P/S	Probabilidade (Q/S > 0)	Condição de escoamento antecedente
0	0	
0,085	0,10	ARC I
0,2	0,50	ARC II
0,456	0,90	ARC III
$\infty$	1	

A intenção original do método do CN foi o evento de cheia de projeto, o que implica numa seleção de grandes eventos para determinar o CN a partir de dados de campo. Seguindo esta idéia, Hawkins et al. (1985) propõem que a seleção dos dados seja baseada na precipitação, ou seja, somente dados com  $P > 0,456.S$  ou  $\Pr(Q/S > 0) = 0,90$ , com  $S$  definido na ARC II, devem ser usados para determinar o CN. Além disso, está claro na Figura 2.7 que  $P/S$  menores que 0,456 tendem a elevar a estimativa do parâmetro CN. Esse é o efeito de pequenos eventos de chuva, o qual tem sido observado por vários pesquisadores. Portanto, esse critério exclui os “pequenos” eventos que tendem a elevar a estimativa do parâmetro CN. Assim, todos os valores de  $P/S < 0,46$  podem ser excluídos do cálculo da média dos valores da retenção potencial máxima. Contudo, o procedimento não é tão simples. A retenção potencial máxima de referência,  $S$ , é definida ou estimada do mesmo conjunto de dados. Desta maneira, o processo consiste em eliminar eventos de modo que todos os eventos incluídos na estimativa do parâmetro  $S$  satisfaçam a condição  $P/S < 0,46$ .

### 2.3.5. Método Assintótico – AS

Hawkins (1979) mostrou em seu trabalho que para alguns casos existe uma tendência do CN decrescer com o aumento da magnitude da chuva. Hjelmfelt et al. (1982) e Hawkins et al. (1985) mostraram a importância da magnitude da chuva na estimativa do CN devido a tendência de se obter elevados valores para o CN se pequenas chuvas forem usadas. As conclusões desses trabalhos indicam que existe uma dependência entre o CN e a magnitude da chuva, a qual é mais evidente se o princípio da frequência igualada, introduzido por Hjelmfelt (1980), for aplicado à

série natural de dados. Seguindo esta idéia, Hawkins (1993) classificou separadamente a série de chuva e de escoamento superficial direto e as realinhou tomando como base o número de ordem, criando assim um novo conjunto de pares de eventos chuva-escoamento, chamada de série ordenada. Isto significa imaginar que para cada par de eventos nesta nova série a chuva e o escoamento possuem o mesmo período de retorno. Contudo, o escoamento não está necessariamente associado com a sua chuva causativa original.

Usando séries ordenadas, Hawkins (1993) calculou o CN para cada par de eventos, os quais foram picotados contra a chuva. Neste trabalho o autor verificou que o CN varia com a magnitude da chuva e que na maioria dos casos ele se aproxima de um valor constante para as grandes chuvas. Desta análise, três comportamentos foram reconhecidos e definidos por Hawkins (1993) como Padrão, Complacente e Violento.

O comportamento Padrão, ilustrado na Figura 2.9, é caracterizado pelo declínio do CN com o aumento da magnitude da chuva, tendendo assintoticamente a um valor constante ou aproximadamente constante para grandes chuvas. É o comportamento mais comum e ocorre na maioria das bacias agrícolas e urbanas (HAWKINS et al., 2009), onde se supõe que o escoamento superficial hortoniano seja dominante.

O comportamento Complacente é também caracterizado pelo declínio do CN com o aumento da magnitude da chuva, mas sem a evidência de se aproximar de um valor constante, conforme apresentado na Figura 2.10. Este comportamento pode ser causado por pequenas áreas variáveis de afluência como pode surgir da precipitação direta sobre o canal. Sua ocorrência tem sido registrada em bacias perenes cobertas por florestas ou matas (HAWKINS, 1993).

O comportamento Violento é caracterizado inicialmente pelo comportamento Complacente (declínio do CN com a chuva), mas também por uma mudança repentina onde o CN aumenta com a magnitude da chuva e tende a um valor aproximadamente constante para grandes chuvas. Um exemplo deste comportamento é apresentado na Figura 2.11.

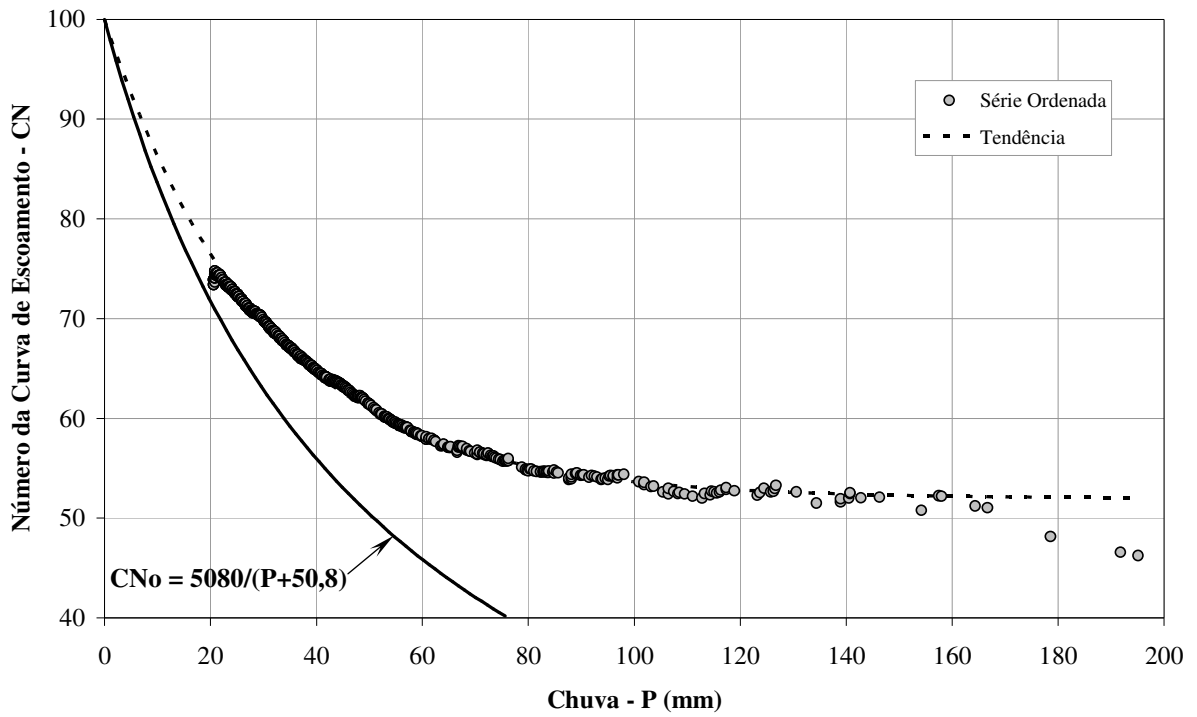


Figura 2.9. Comportamento Padrão. Bacia Coweeta 2, North Carolina. Fonte: Hawkins (1993).

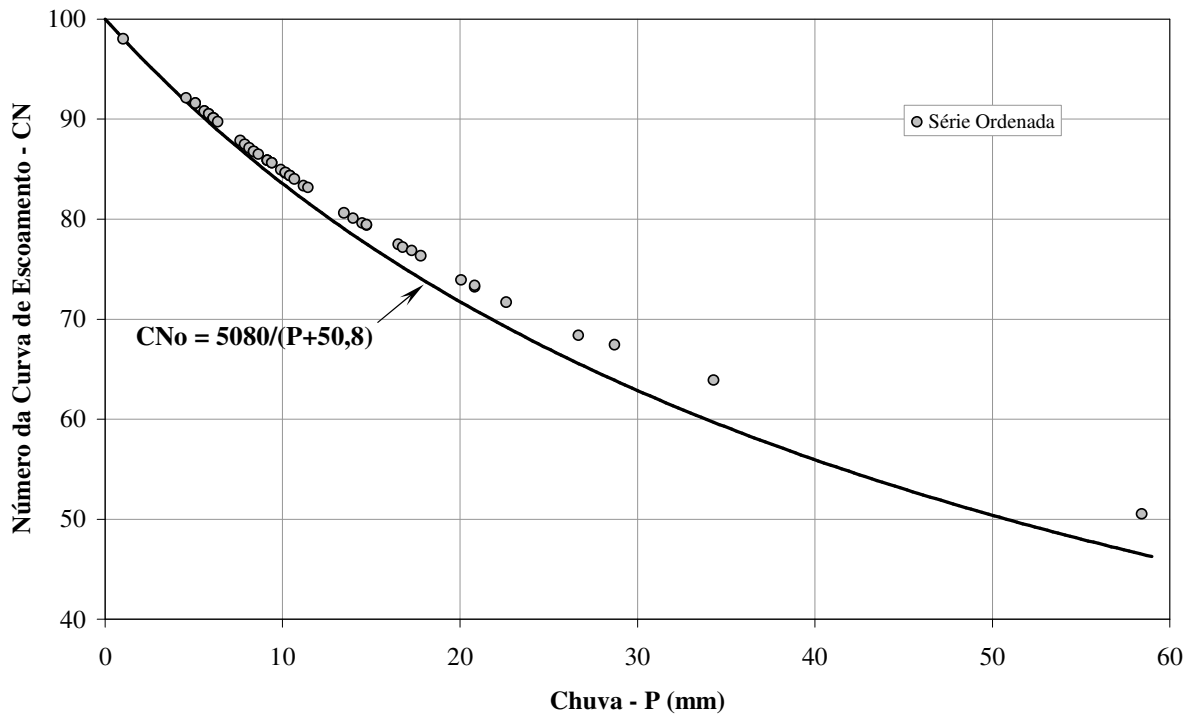


Figura 2.10. Comportamento Complacente. Bacia West Donaldson, Malheur NF, Oregon. Fonte: Hawkins (1993).

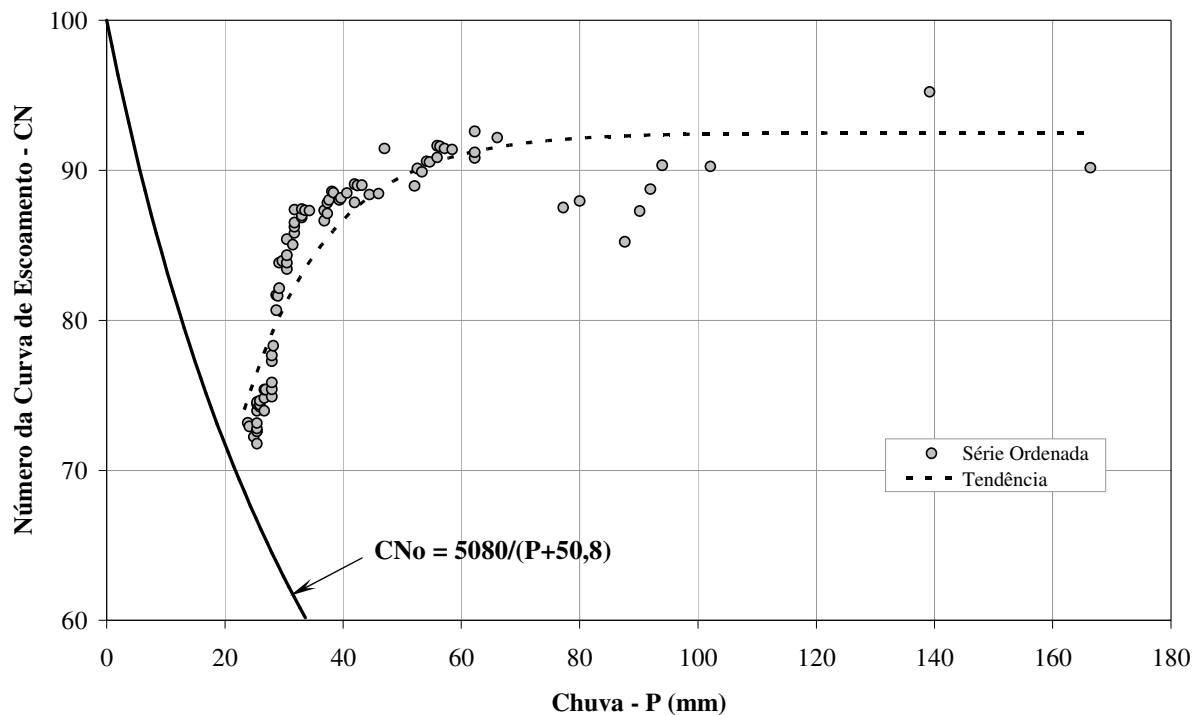


Figura 2.11. Comportamento Violento. Bacia Berea 6, Kentucky. Fonte: Hawkins (1993).

### 2.3.6. Método da Frequência Log-Normal - LN

É um método alternativo proposto por Schneider e McCuen (2005) para uso com séries anuais. O procedimento consiste em calcular o logaritmo da chuva ( $P$ ) e do escoamento superficial direto ( $Q$ ) para cada par de eventos chuva-escoamento. O valor do parâmetro  $S$  é obtido com a Equação 2.9 usando o inverso das médias dos logaritmos de  $P$  e  $Q$ . Segundo os autores, este procedimento reduz o desequilíbrio do peso atribuído aos grandes valores de  $P$  uma vez que o logaritmo das chuvas reduz todos os valores proporcionalmente.

## 2.4. Considerações finais

O Método do Número da Curva de Escoamento ou simplesmente Método do CN, desenvolvido na década de 1950 pelo “Soil Conservation Service” (atual “Natural Resources

Conservation Service” – NRCS), é muito aplicado atualmente dentro e fora dos Estados Unidos da América (EUA) para estimativa da chuva excedente a partir de chuvas, principalmente para bacias não monitoradas.

O uso do método depende da escolha do parâmetro CN. Na maioria dos casos ela é feita de modo estimativo devido à falta de dados locais para calibração do parâmetro. Nesta situação o CN é escolhido em tabelas de referência com base no grupo hidrológico de solo, no uso e manejo do solo e na condição de escoamento antecedente. O CN assim adotado é para a Condição de Escoamento Antecedente II, o qual é usado com uma chuva de projeto apropriada para calcular a chuva excedente com a Equação 2.9 e, via procedimentos não descritos aqui, vazão de pico e hidrograma. A Figura 2.12 apresenta um fluxograma com o procedimento padrão do Método do CN para estimar a chuva excedente em bacias sem monitoramento de chuva e vazão.

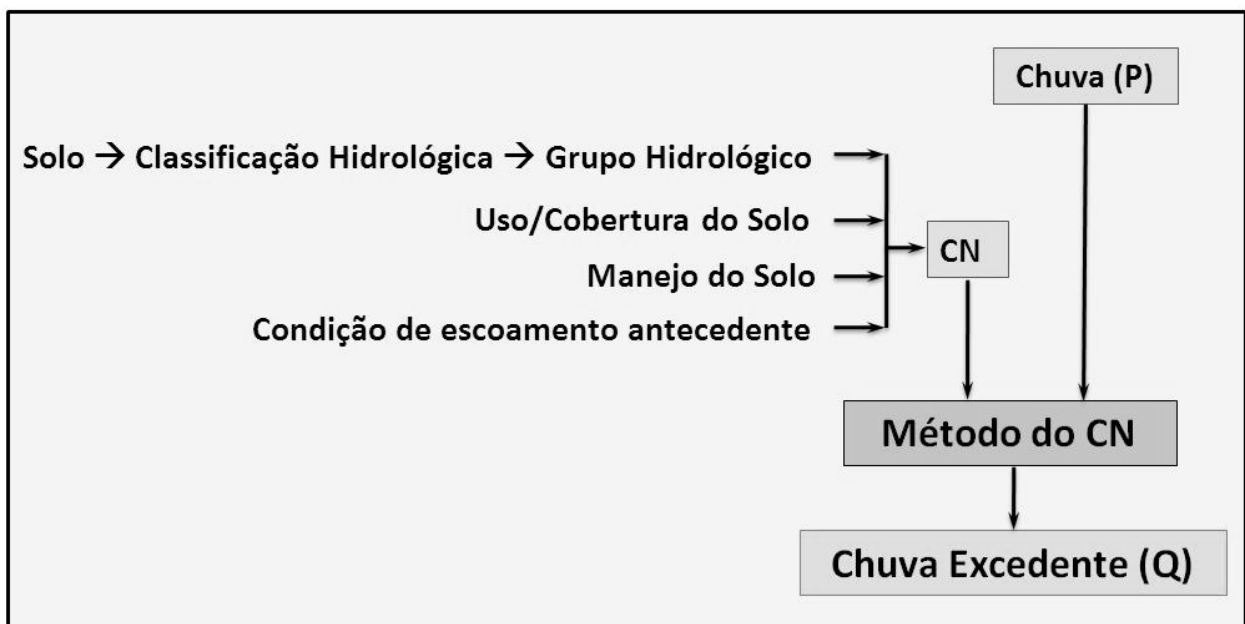


Figura 2.12. Procedimento padrão do Método do CN para estimar a chuva excedente em bacias sem monitoramento de chuva e vazão

Com o procedimento ilustrado na Figura 2.12, os solos são classificados em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) de acordo com o potencial de escoamento superficial, sendo A o grupo de menor e D o grupo de maior potencial. Neste ponto, a maior dificuldade é classificar hidrológicamente um determinado solo.

As definições dos grupos hidrológicos de solos, inicialmente propostas por Musgrave (1955) e incorporadas ao Método do CN (SCS, 1972), não possuem critérios objetivos para aplicar o método dentro e fora dos EUA, ou seja, a profundidade do solo é mencionada apenas na definição dos grupos A e B, porém um limite de profundidade não é apresentado, enquanto no grupo C estão basicamente os solos de textura moderadamente fina até textura fina, isto é, solos compostos por silte e argila. O grupo D inclui basicamente os solos argilosos. Brakensiek e Rawls (1983) apresentaram uma simplificação para a classificação hidrológica de solos que fundamentalmente se baseia nas classes texturais do USDA. Isso obviamente diminui a subjetividade, mas somente a textura não é suficiente para classificar um solo hidrológicamente.

Segundo Hawkins (2005) existiram, infelizmente, poucos desenvolvimentos subsequentes sobre o assunto e existem poucos critérios objetivos para fazer as identificações dos grupos hidrológicos fora dos EUA. Para ele a classificação vai além da classe textural e da capacidade de infiltração. Segundo Nielsen e Hjelmfelt (1998) a falta de critérios objetivos tem levado a inconsistências na classificação dos solos por todo os EUA, ou seja, a interpretação varia de cientista para cientista de solo e de usuário para usuário. Como resultado, os critérios dos grupos hidrológicos não foram aplicados uniformemente (NIELSEN e HJELMFELT, 1998). Este problema de inconsistência pode ser agravado quando a classificação hidrológica for usada em regiões climáticas distintas daquela de sua origem, ou seja, em regiões tropicais.

No Brasil o Método do CN é utilizado e recomendado por entidades que aprovam e fiscalizam projetos de engenharia de recursos hídricos tais como o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo, o Departamento de Estradas de Rodagem (DER) do Estado de São Paulo e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Assim, os usuários estão livres para fazer suas próprias interpretações sobre a classificação original (SCS, 1972) ou sobre sua simplificação (BRAKENSIEK e RAWLS, 1983). No Brasil a tradução dessas duas propostas encontra-se publicada nos livros técnicos de referência sobre hidrologia (RIGUETTO, 1998; TUCCI, 2000) e em normas e manuais da maioria das referidas entidades (DER-SP, 2001; DNIT, 2005).



Devido ao problema de inconsistência classificação hidrológica de solos, o NRCS revisou as características gerais de cada grupo hidrológico e desenvolveu critérios de classificação baseados essencialmente na profundidade da camada impermeável, na profundidade do lençol freático e na condutividade hidráulica saturada da camada menos permeável. As principais melhorias da atualização da classificação hidrológica de solo com relação à versão anterior (SCS, 1972) e sua simplificação (BRAKENSIEK e RAWLS, 1983) estão nas descrições gerais dos grupos hidrológicos e nas definições dos critérios de classificação, as quais são: (1) definição de faixa de valores para a condutividade hidráulica saturada da camada menos permeável em função da profundidade da camada impermeável para cada grupo hidrológico; (2) definição das porcentagens de argila e areia para cada grupo hidrológico, ou seja, não mencionar apenas “solos arenosos profundos” ou “solos arenosos menos profundos”; (3) alerta sobre a possibilidade de indicar um solo de textura mais fina para um grupo hidrológico com menor potencial de escoamento desde que este solo possua características que lhe proporcionem uma melhor condição de drenagem interna quando comparado com outro solo de mesma textura ou de textura mais grossa.

Embora a inclusão da condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) como critério tenha tornado a nova classificação hidrológica (NRCS, 2007) mais objetiva do que a versão anterior (SCS, 1972) e sua simplificação (BRAKENSIEK e RAWLS, 1983), para sua aplicação é necessário medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil do solo. De fato, as propriedades mais importantes dos solos que influenciam a resposta hidrológica de uma bacia são a condutividade hidráulica e a retenção de umidade do solo. Embora o progresso que se tenha feito em medições de características hidráulicas, a maioria destas técnicas exige abertura de trincheiras e deslocamento de aparelhos, seja para ensaios locais ou para coleta e acondicionamento de amostras, transporte de amostras para ensaios laboratoriais e etc. Essas atividades ainda consomem muito tempo e, portanto, são custosas (WÖSTEN et al., 2001). Isso leva a escassez de dados sobre propriedades hidráulicas de solos, como é o caso do Brasil.

Com isso, os únicos critérios viáveis e possíveis de serem aplicados da atual classificação hidrológica do NRCS vêm da inferência baseada nas características gerais de cada grupo hidrológico. Como estas características estão fortemente baseadas na textura, isto pode

resultar novamente na adoção das classes texturais como único critério possível para associar solos aos grupos hidrológicos. No entanto, somente a textura não é suficiente para ser adotada como critério. Por exemplo, Latossolos argilosos são classificados como A e B (LOMBARDI NETO et al., 1989; SARTORI et al., 2005a), enquanto o NRCS (2007) classifica solos argilosos como D ou talvez C. Isso indica que há uma diferença entre os tipos de argila que compõe a maioria dos solos de clima temperado e de clima tropical.

Por esse motivo, alguns atributos do solo geralmente presentes em levantamentos e mapas de solos têm sido usados para inferir sobre seu comportamento hidrológico. O trabalho de Langan e Lammers (1991) para os EUA, o de Lombardi Neto et al. (1989) e o de Sartori et al. (2005a; 2005b) para o Brasil são exemplos de tentativas neste aspecto. Contudo, estas propostas brasileiras ainda possuem critérios que estão sujeitos a interpretações subjetivas. Por exemplo, estas classificações não consideram a influência da profundidade da mudança textural abrupta ou de outro horizonte mais restritivo.

Outra dificuldade de aplicação do Método do CN é a falta de valores locais de referência para o parâmetro CN, a qual está relacionada principalmente a carência de dados observados de chuva e vazão em pequenas bacias hidrográficas com um único complexo hidrológico (i.e., uma única combinação de um grupo hidrológico de solo com uma classe de uso e tratamento da terra). Dados hidrológicos observados em bacias hidrográficas com essas características são fundamentais para a determinação do CN de referência. Sendo assim, os valores de referência obtidos de experiências norte americanas são vastamente usados como referência para projetos.

Portanto, estudos devem ser desenvolvidos para adaptar ou melhorar a aplicação do Método do CN em regiões diferentes daquelas de seu desenvolvimento, principalmente no que diz respeito ao estabelecimento de novos critérios de classificação hidrológica de solos e de valores locais de referência para o parâmetro CN.

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1. Introdução**

Neste trabalho procurou-se desenvolver novos critérios de classificação hidrológica de solos que fossem pouco suscetíveis a interpretações subjetivas e que não necessitassem de medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil, ou seja, procurou-se desenvolver uma classificação hidrológica de solos que atendesse as necessidades e as realidades do Brasil. Então, teria que ser uma classificação que levasse em conta os diferentes tipos de solo do Brasil e que fosse baseada nas informações disponíveis sobre solos devido às dificuldades de se fazer medição de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil e devido à escassez de dados de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil de solo para diferentes solos do Brasil. Também procurou-se definir valores locais de referência para o parâmetro CN visando suprir parte da lacuna existente no Brasil, que é a carência de valores locais de referência. Por esse motivo ainda são adotados, no Brasil, os valores de referência determinados para o EUA.

No desenvolvimento dos critérios de classificação hidrológica de solos foi realizado um estudo bibliográfico para escolher quais atributos do solo poderiam ser usados. Duas referências importantes para esta escolha foram Oliveira (2005) e Embrapa (2006). Para verificar a consistência entre a classificação hidrológica proposta e a classificação hidrológica revisada do NRCS foram usadas medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil do solo. Esses dados foram essencialmente obtidos em publicações tais como dissertações, teses e periódicos e compreendem 58 perfis de solos representativos do Brasil.

Para determinar valores de referência para o parâmetro CN houve a necessidade de se obter dados observados de chuva e escoamento superficial direto resultante em pequenas bacias hidrográficas que possuíssem um único complexo hidrológico, ou seja, um único uso e manejo do solo associado um único grupo hidrológico de solo, de preferência definido por um único tipo de solo. Por serem dados sob condições pré-estabelecidas, não era possível obter recursos para implantação e monitoramento de várias unidades em tempo hábil para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Por esse motivo foram realizados contatos com universidades, institutos de pesquisa, empresas privadas e pesquisadores que ao longo dos anos tem realizado este tipo de monitoramento em diferentes locais do Brasil. Dos contatos realizados e bem sucedidos foram obtidos dados observados de chuva e escoamento superficial direto resultante em 37 bacias hidrográficas. Também foi realizada uma busca por dados publicados que atendessem os requisitos mínimos para a determinação do CN, ou seja, dez pares de eventos observados de chuva e escoamento superficial resultante numa bacia hidrográfica. Com isso foram obtidos dados observados de chuva e escoamento superficial direto para mais 12 bacias hidrográficas. Assim, um total de 49 bacias foi obtido para este estudo. Na seqüência é apresentada no item 3.2 uma descrição dos dados hidrológicos e a lista de perfis de solos com dados de condutividade hidráulica saturada e sua fonte de referência. A base para elaboração dos critérios de classificação hidrológica de solos é apresentada no item 3.3 e no item 3.4 são feitas as considerações sobre a aplicação das classificações hidrológicas proposta e do NRCS (2007) aos 58 perfis de solos. No item 3.5 são apresentados os procedimentos de calibração do parâmetro CN. No item 3.6 é apresentada a metodologia de avaliação dos métodos de calibração do parâmetro CN para a escolha de métodos a serem usados no item 3.7, onde são apresentados os critérios para a determinação do CN de referência para alguns locais/bacias com os seguintes usos: solo nu; solo sem cultivo; milho; soja e trigo em rotação; cana-de-açúcar; eucalipto; cactos; caatinga.

### **3.2. Dados**

A escassez de dados hidrológicos básicos, ou seja, registros de chuva e vazão para pequenas bacias hidrográficas e parcelas experimentais, assim como dados de propriedades hidráulicas de solos nas regiões tropicais, onde se encontra a maioria dos países em

desenvolvimento, é um problema real devido à falta de recursos para o monitoramento e levantamento de dados básicos para o desenvolvimento de pesquisas. Esta foi uma dificuldade encontrada na etapa de aquisição de dados para a realização deste trabalho. As principais fontes de aquisição de dados hidrológicos e de condutividade hidráulica saturada para solos brasileiros foram: (a) Instituto Agrônomo de Campinas - IAC; (b) Universidade Federal da Paraíba - UFPB; (c) Empresa Aracruz Celulose e Papel; (d) publicações tais como dissertações, teses e periódicos; (e) contatos pessoais. Os dados obtidos e usados neste estudo são apresentados na seqüência.

### **3.2.1. Dados Hidrológicos**

Os dados hidrológicos obtidos para este estudo compreendem o registro da chuva e do escoamento resultante para eventos monitorados em 43 parcelas experimentais (ou mini bacias hidrográficas) e em 8 pequenas bacias hidrográficas de diferentes locais do Brasil. O nome “parcela experimental” refere-se a bacias hidrográficas muito pequenas, conhecidas também como talhões experimentais, as quais são usadas para o registro do monitoramento de perdas de solo por erosão hídrica e também para registro do monitoramento de escoamento superficial direto, considerando o uso e o manejo do solo. No sistema implantado pelo Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, a cada parcela é adaptado a jusante da soleira um sistema coletor de solo e escoamento superficial. Ele é construído de alvenaria, inclusive a soleira e a parede divisória da parcela. Os sistemas coletores podem possuir dois ou mais tanques, de acordo com a área da parcela, ambos ligados em série. Por exemplo, nos sistemas com dois tanques, o fluxo da enxurrada proveniente do primeiro tanque é fracionado por um divisor tipo Geib, obtendo-se uma fração alíquota correspondente àquele que passa pela janela central do divisor e é conduzido ao segundo tanque para ser medido, e nos sistemas com três tanques, o fluxo da enxurrada proveniente do segundo tanque também é fracionado e a medida é feita no terceiro tanque. Do volume total medido é subtraída a chuva que cai diretamente nos tanques e na calha coletora, que são descobertos. A quantificação da altura precipitada é feita com o pluviômetro. A leitura da enxurrada é feita diariamente às 7 horas, mesmo horário da leitura do pluviômetro.

Os dados cedidos pelo IAC são provenientes de estudos de manejo e conservação do solo e da água realizados em parcelas experimentais em dois municípios do Estado de São Paulo: Campinas e Mococa. Os dados cedidos pela UFPB também são provenientes de estudos de manejo e conservação do solo e da água realizados na Bacia Representativa de Sumé, englobando dados de quatro pequenas bacias e nove parcelas experimentais. Os dados concedidos pela Aracruz Celulose e Papel são registros de chuva e vazão observados em sua bacia hidrográfica experimental. Dados de uma bacia hidrográfica localizada no Município de Bofete, Estado de São Paulo, foram gentilmente cedidos pelo prof. Walter de Paula Lima da ESALQ/USP. Em publicações foram obtidos dados de mais nove parcelas experimentais e mais duas bacias hidrográficas. Três parcelas são do Centro de Pesquisas da Embrapa Cerrado e as demais são do município de Lajes-SC, pertencentes a estudos realizados em manejo do solo e erosão pela Universidade Estadual de Santa Catarina - UDESC. Uma breve caracterização do local com descrição dos dados obtidos é apresentada a seguir.

## Campinas, SP.

O experimento foi conduzido no campo, sob condições de chuva natural, na Estação Experimental de Campinas do Instituto Agrônomo de Campinas, localizado no município de Campinas, a 47°04' de longitude oeste e 22°15' de latitude sul, com altitude entre 600 e 700 m (DE MARIA e LOMBARDI NETO, 1997). A temperatura máxima média anual é de 27,3°C e a mínima média anual de 15,9°C. A precipitação média anual é de 1418 mm (1954-1988). O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, correspondente a mesotérmico úmido com verões quentes. O solo do local do experimento é um Latossolo Vermelho Distroférrico textura muito argilosa.

Os dados coletados pertencem a parcelas (talhões) experimentais de 1875 m<sup>2</sup> e 100 m<sup>2</sup> que medem 75 e 25 metros de comprimento no sentido do declive por 25 e 4 metros de largura, respectivamente. A declividade média das parcelas é de 9%. O escoamento superficial direto e a chuva foram medidos diariamente às 7 horas da manhã. Na Tabela 3.1 são apresentadas a

identificação das parcelas, o período de observação, o número de eventos medidos de escoamento superficial direto e o manejo do solo.

Tabela 3.1. Características das parcelas experimentais de Campinas, SP.

Parcela	Área (m <sup>2</sup> )	Período de observação	N	Uso	Manejo
CC246	100	1973-1980	351	milho	plantio morro abaixo e restos culturais queimados
CC247	100	1973-1980	325	milho	plantio morro abaixo e restos culturais incorporados
CC248	100	1973-1980	330	milho	plantio em contorno e restos culturais incorporados
CC249	100	1973-1980	266	milho	plantio morro abaixo e restos culturais na superfície
CC4102	1875	1973-1979	172	milho	preparo convencional e cultivos mecânicos
CC4105	1875	1973-1979	174	milho	plantio direto
CC4129	1875	1982-1988	229	milho	preparo com grade pesada e plantio morro abaixo
CC4131	1875	1982-1988	193	milho	plantio direto morro abaixo
CC1133	100	1986-1988	142	sem cultivo	250 kg/ha de restos culturais na superfície
CC1134	100	1986-1988	141	sem cultivo	500 kg/ha de restos culturais na superfície
CC1135	100	1986-1988	141	sem cultivo	1000 kg/ha de restos culturais na superfície
CC1136	100	1986-1988	145	sem cultivo	1500 kg/ha de restos culturais na superfície
CC1137	100	1986-1988	138	sem cultivo	2000 kg/ha de restos culturais na superfície
CC1138	100	1986-1988	134	sem cultivo	4000 kg/ha de restos culturais na superfície
CC1139	100	1986-1988	134	sem cultivo	8000 kg/ha de restos culturais na superfície
CC201	100	1979-1985	477	sem cultivo	solo nu sem aração
CC298	100	1960-1972	258	cana	tradicional: colheita anual com replantio a cada 3 anos
CC299	100	1973-1979	206	cana	contínua: sem colheita e sem replantio
CC250	100	1980-1986	339	soja/trigo	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos incorporados e plantio morro abaixo
CC251	100	1980-1986	391	soja/trigo	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos queimados e plantio morro abaixo
CC252	100	1980-1986	271	soja/trigo	restos na superfície e plantio direto morro abaixo/restos na superfície e plantio direto morro abaixo
CC253	100	1980-1986	363	soja/trigo	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos na superfície e plantio morro abaixo

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero.

## Mococa, SP.

O experimento foi conduzido no campo, sob condições de chuva natural, na Estação Experimental de Mococa do Instituto Agrônomo de Campinas, localizado no município de

Mococa, a 47°01' de longitude oeste e a 21°28' de latitude sul, com uma altitude média de 665 m (DE MARIA e LOMBARDI NETO, 1997). A temperatura máxima média anual é de 28,3°C e a mínima média anual de 16,4°C. A precipitação média anual é de 1556 mm (1959-1991). O clima é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, correspondente a tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo do local do experimento é um Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico textura argilosa/muito argilosa.

Os dados utilizados neste estudo pertencem a parcelas experimentais de 100 m<sup>2</sup> que medem 25 metros de comprimento no sentido do declive por 4 metros de largura. A declividade média das parcelas é 9,4 %. O escoamento superficial direto e a chuva foram medidos diariamente às 7 horas da manhã. São apresentados na Tabela 3.2 a identificação das parcelas, o período de observação, o número de eventos de escoamento superficial direto e o manejo praticado.

Tabela 3.2. Características das parcelas experimentais de Mococa, SP.

<b>Parcela</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Período de observação</b>	<b>N</b>	<b>Uso</b>	<b>Manejo</b>
CP247	100	1979-1985	402	milho	plantio morro abaixo e restos culturais incorporados
CP249	100	1980-1985	241	milho	plantio morro abaixo e restos culturais na superfície
CP201	100	1980-1985	158	sem cultivo	solo nu sem aração

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero.

## Sumé, PB.

O experimento foi conduzido na Bacia Experimental de Sumé, PB, operada por pesquisadores da área de Recursos Hídricos do Campus II da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em Campina Grande. A estação está localizada na Fazenda Nova, no município de Sumé, PB, situada na altura do km 118 da BR-412, entre as cidades de Sumé e Monteiro, na latitude 7°40' Sul e longitude 37°00' Oeste, com altitude entre 500 e 700 m (SRINIVASAN e GALVÃO, 2003). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo climático BSh, (semi-árido), caracterizado por insuficiência e irregularidade das precipitações



pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas (CADIER et al., 1983). A precipitação pluvial média anual, observada no período de 1986 a 1990, foi de 695 mm (ALBUQUERQUE et al., 2002). A temperatura média anual histórica é de 24°C e a umidade relativa média anual de 57% (CADIER et al., 1983). O solo no local do experimento é Luvissole Hipocrômico Órtico vértico, A fraco, textura argilosa fase caatinga hiperxerófila.

Os dados coletados pertencem a quatro pequenas bacias com áreas de 0,5 e 1 ha e nove parcelas experimentais de 100 m<sup>2</sup>. O escoamento superficial direto e a chuva foram medidos diariamente às 7 horas da manhã. Havia também dois pluviógrafos para o registro contínuo da chuva. Na Tabela 3.4 são apresentadas as bacias/parcelas experimentais, o período de observação, o número de eventos de escoamento superficial direto e manejo praticado. Na Tabela 3.5 são apresentados o perímetro, o comprimento mais longo do escoamento, o coeficiente de compacidade e o fator de forma para as bacias com canais.

Tabela 3.3. Características das bacias e parcelas da estação experimental de Sumé, PB.

Bacia	Área (m <sup>2</sup> )	Período de observação	N	I (%)	Uso	Manejo
SUM01	6200	1982-1991	65	7,0	caatinga	Caatinga nativa
SUM02	10700	1982-1991	65	6,2	caatinga	Caatinga nativa
SUM03	5200	1982-1991	202	7,1	sem cultivo	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm
SUM04	4800	1982-1991	199	6,8	sem cultivo	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm
SUP01	100	1982-1991	241	3,8	sem cultivo	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm
SUP02	100	1982-1991	129	3,9	sem cultivo	Vegetação rasteira com cobertura morta
SUP03	100	1982-1991	111	7,2	sem cultivo	Vegetação rasteira com cobertura morta
SUP04	100	1982-1991	227	7,0	sem cultivo	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm.
SUP05	100	1982-1991	78	9,5	caatinga	Caatinga nativa
SUP06	100	1983-1988	168	4,0	cactos	Palma morro abaixo
SUP07	100	1983-1988	159	4,0	cactos	Palma em contorno
SUP08	100	1986-1991	100	4,0	sem cultivo	Solo nu com superfície favorável ao escoamento
SUP09	100	1986-1991	43	4,0	caatinga	Caatinga renascida

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero.

I = declividade média da bacia.

Fonte: Srinivasan e Galvão (2003).

Tabela 3.4. Características adicionais das bacias da estação experimental de Sumé, PB.

Bacia	Perímetro (m)	Percurso mais longo do escoamento (m)	Índice de Compacidade	Fator de forma
SUM01	398	160	1,43	0,24
SUM02	466	161	1,27	0,41
SUM03	302	113	1,18	0,40
SUM04	270	106	1,10	0,42

Fonte: Srinivasan e Galvão (2003).

### Planaltina, DF.

O experimento foi conduzido no Centro de Pesquisas Agropecuárias dos Cerrados, da Embrapa, localizado no município de Planaltina, DF. O clima da região é classificado como Cwa, segundo Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. O solo do local do experimento é um Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, textura argilosa.

Os dados coletados pertencem a parcelas experimentais de 77 m<sup>2</sup> que medem 22 metros de comprimento no sentido do declive por 3,5 metros de largura. A declividade média das parcelas é 5,5 %. O escoamento superficial direto era medido diariamente e a chuva registrada em pluviogramas de 24 horas. A Tabela 3.5 apresenta os talhões, período de observação, número de eventos de escoamento superficial direto e manejo praticado. Estes dados encontram-se publicados em Dedecek (1989).

Tabela 3.5. Características das parcelas da estação experimental da Embrapa Cerrados.

Parcela	Área (m <sup>2</sup> )	Período de observação	N	Uso	Manejo
EC01	77	1985-1986	24	sem cultivo	solo nu submetido a uma aração e gradagem
EC02	77	1985-1986	24	sem cultivo	solo sem vegetação e com cobertura de sombrite, suspensa a 10 cm acima da superfície do solo
EC03	77	1985-1986	24	sem cultivo	solo sem vegetação e com cobertura de sombrite colocada na superfície do solo

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero.

Fonte: Dedecek (1989).

## Lajes, SC.

O experimento foi conduzido no campo, sob condições de chuva natural, no Campus do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages (SC), localizado entre 27°49' de latitude Sul e 50°20' de longitude Oeste, a 937 m de altitude, na região do Planalto Sul Catarinense. A temperatura máxima média anual é de 21,7°C e a mínima média anual de 11,5°C. O clima é do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen, correspondente a subtropical úmido, chuvoso, com verões frescos. O solo do local do experimento é um Cambissolo Húmico alumínico léptico, argiloso, horizonte A moderado e com substrato composto de siltitos e argilitos (AMARAL, 2006).

Os dados coletados pertencem a parcelas experimentais de 77,35 m<sup>2</sup> que medem 22,1 metros de comprimento no sentido do declive por 3,5 metros de largura. A declividade média das parcelas é 10,2 %. O escoamento superficial direto foi medido diariamente e a chuva registrada em pluviogramas de 24 horas. A Tabela 3.6 apresenta os talhões, período de observação, número de eventos de escoamento superficial direto e manejo praticado. Estes dados foram publicados por Amaral (2006).

Tabela 3.6. Características das parcelas do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages, SC.

Parcela	Área (m <sup>2</sup> )	Período de observação	N	Uso	Manejo
LSC1	77,35	2002-2005	97	sem cultivo	Solo nu submetido a uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano.
LSC2	77,35	2002-2005	97	sem cultivo	Solo nu submetido a uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano.
LCM	77,35	2002-2005	97	soja-trigo	Cultivo mínimo: solo submetido a uma escarificação e uma gradagem, duas vezes ao ano.
LPC	77,35	2002-2005	96	soja-trigo	Preparo convencional: solo submetido a uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano.
LSD1	77,35	2002-2005	97	soja-trigo	Semeadura direta: semeadura sem mobilização prévia do solo.
LSD2	77,35	2002-2005	94	soja-trigo	Semeadura direta: semeadura sem mobilização prévia do solo.

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero.

Fonte: Amaral (2006).

## Aracruz, ES.

A bacia hidrográfica da Aracruz Celulose e Papel (WARA) encontra-se no município de Aracruz, ES, situada a 14 km da costa, entre as coordenadas 19°35' e 20°15' de latitude sul e 40°00' e 40°20' de longitude oeste. O clima da região é Aw segundo a classificação de Köppen, clima tropical úmido, com estações chuvosas no verão e seca no inverno. A precipitação média anual é de 1400 mm (MARTINS, 2005).

Os dados utilizados neste estudo compreendem o período de 1996 a 2004. A precipitação foi medida em três medidores automáticos de chuva tipo balança instalados no interior da bacia. Os níveis d'água foram registrados com linígrafo automático instalado em um vertedor triangular. A locação destes postos de monitoramento pode ser observada na Figura 3.1.

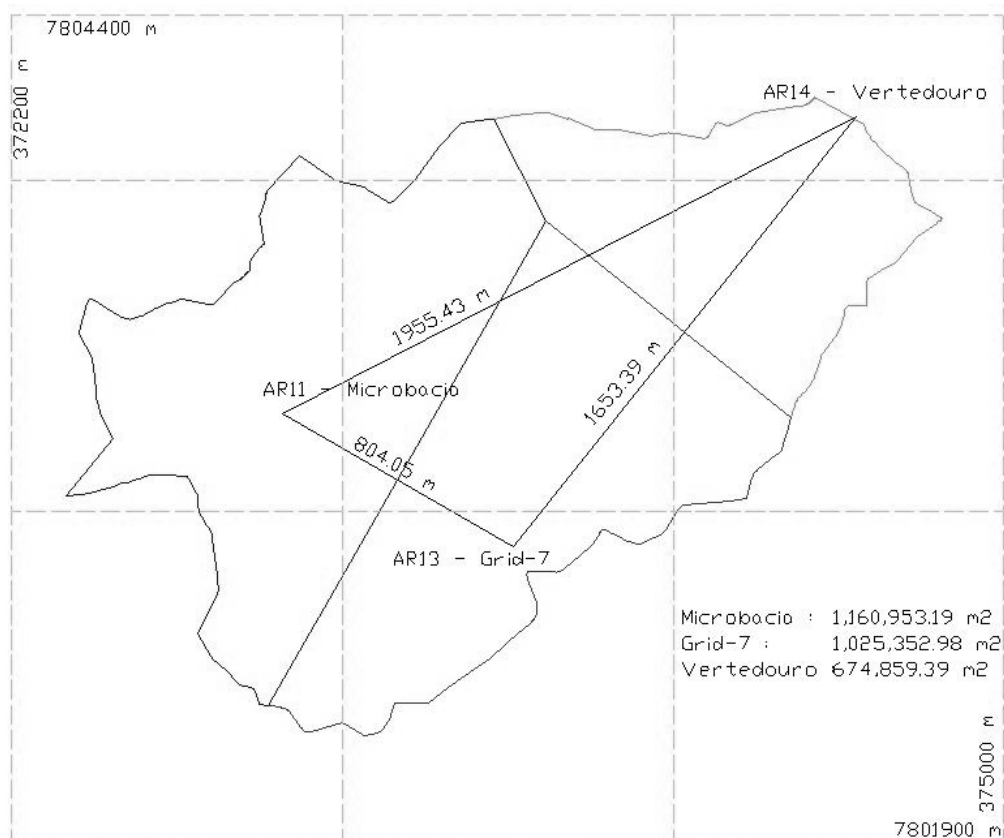


Figura 3.1. Localização dos postos de monitoramento de chuva (AR11, AR13 e AR14) e de vazão (AR14) na bacia hidrográfica WARA com traçado dos polígonos de Thiessen.

A série histórica de vazões foi analisada e permitiu selecionar 19 eventos cujo critério de seleção foi a vazão de pico maior ou igual a 80 l/s. A chuva média na bacia para os eventos selecionados foi estimada usando o método dos polígonos de Thiessen. O escoamento superficial direto foi obtido pela análise de eventos e calculado pela integração da área sob o hidrograma, subtraindo o escoamento básico. O método usado para a separação do escoamento básico foi o da declividade constante (CHOW et al., 1988).

O uso principal da bacia hidrográfica é o eucalipto, seguido de mata nativa ciliar e estradas. Os solos da bacia são Argissolo Amarelo textura arenosa/média (PA1), Argissolo Amarelo moderadamente rochoso (PA8), Plintossolo Háplico (FX) e Gleissolo (P5). Na Tabela 3.7 são apresentadas as principais características físicas da bacia. A Tabela 3.8 apresenta a distribuição de cada uso do solo sobre cada um dos solos mapeados na bacia. As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, os mapas de solo e uso do solo desta bacia.

Tabela 3.7. Principais características físicas da bacia WARA.

<b>Características físicas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Área da bacia	ha	286,17
Perímetro da bacia	m	8214
Comprimento do percurso mais longo do escoamento	m	2866
Coefficiente de Compacidade	-	1,37
Fator de Forma	-	0,35
Declividade média da bacia	%	13,7

Fonte: Avanzi (2005).

Tabela 3.8. Solo e uso da terra na bacia experimental da Aracruz em hectares.

<b>Uso do solo</b>	<b>Solo</b>				<b>Total</b>
	<b>PA1</b>	<b>FX</b>	<b>PA8</b>	<b>P5</b>	
Eucalipto	152,71	21,10	14,92	0,01	188,74
Mata Nativa	1,21	0,23	69,28	14,72	85,44
Estrada	7,68	0,67	3,63	0,01	11,99
<b>Total</b>	161,60	22,00	87,83	14,73	286,17

Fonte: Aracruz (1995).

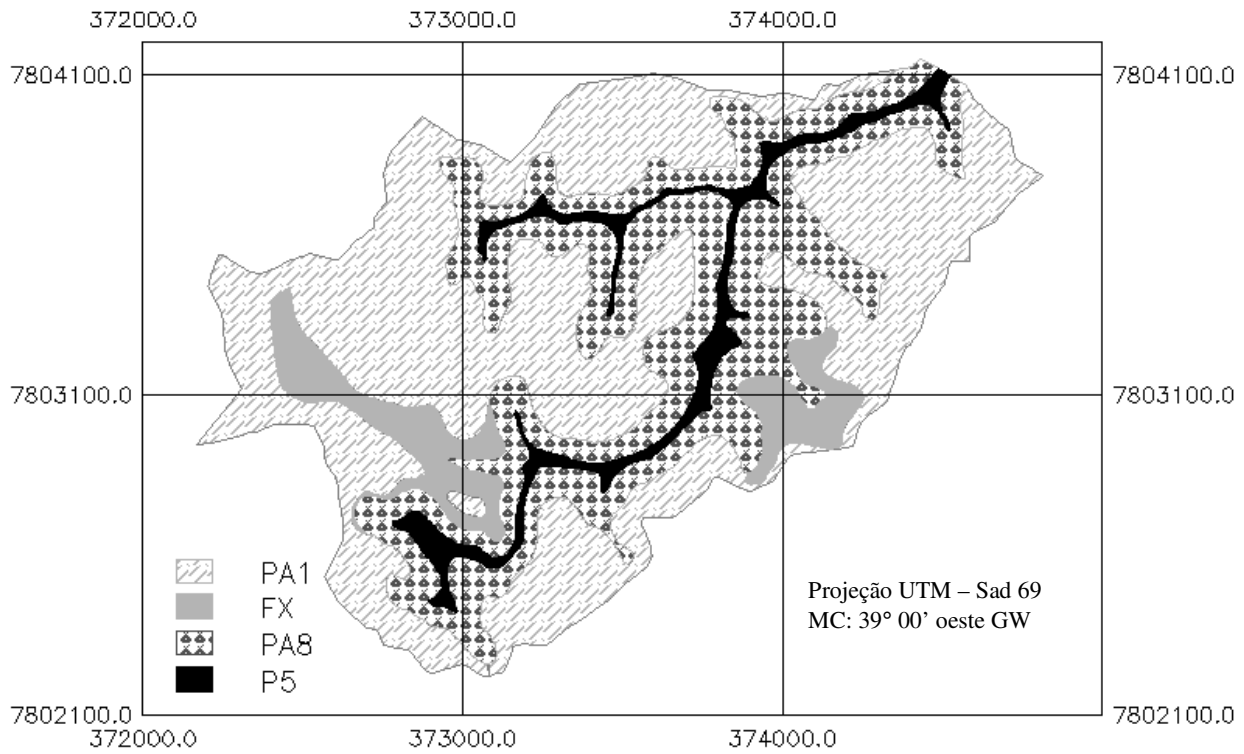


Figura 3.2. Mapa de solos da bacia hidrográfica WARA. Fonte: Aracruz (1995).

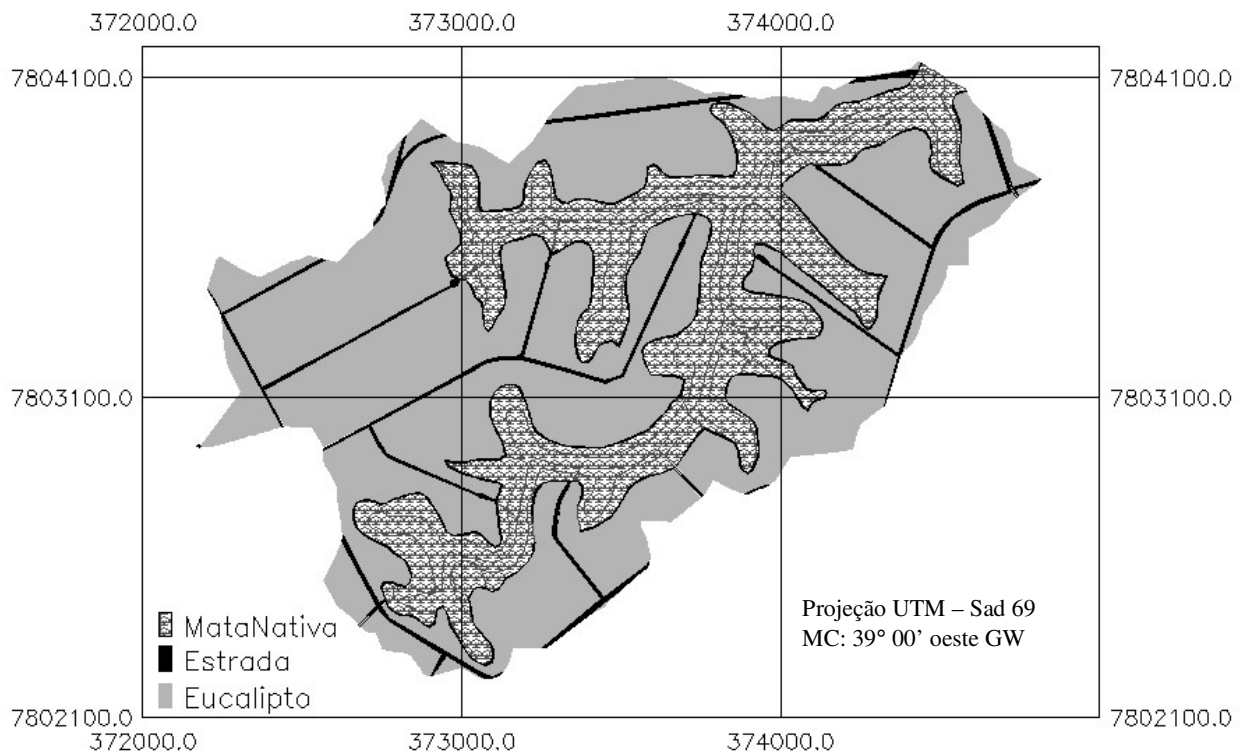


Figura 3.3. Mapa de uso do solo da bacia hidrográfica WARA. Fonte: Aracruz (1995).

## Bofete, SP.

O município de Bofete-SP está localizado na região centro-sul do estado de São Paulo, compreendendo as coordenadas: 23°04' de latitude sul e 48°13' de longitude oeste. A elevação média é de 600 m. O clima regional é do tipo mesotérmico úmido (Cfa), conforme classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 1300 mm (SIGRH, 2008). Os dados são de uma bacia hidrográfica, denominada aqui de WBOF, coberta por eucaliptos, mata ciliar nativa e estrada de terra. O solo da bacia é um Latossolo Vermelho textura média. As características físicas da bacia são apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9. Principais características físicas da bacia WBOF.

<b>Características físicas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Área da bacia	ha	50,23
Perímetro da bacia	m	2583
Comprimento do percurso mais longo do escoamento	m	931
Coefficiente de Compacidade	-	1,44
Fator de Forma	-	0,58
Declividade média da bacia	%	7,5

Fonte: Mosca, 2003.

O nível das vazões foi registrado com linígrafo digital instalado em um vertedor misto denominado de crista curta, com seção transversal composta, tendo formato triangular com ângulo de 150° em sua parte inferior e formato retangular em sua parte superior, com capacidade de 3 a 1800 l/s. A precipitação foi registrada com medidor automático de chuva tipo balança (Prof. Walter de Paula Lima, comunicação pessoal).

O período de monitoramento compreendeu os anos de 2001 a 2006, com interrupção do monitoramento durante os anos de 2003 e 2004 por atos de vandalismo. Portanto, os quatro anos de registro (2001, 2002, 2005 e 2006) permitiram selecionar dezoito eventos para obtenção dos pares de chuva total e escoamento superficial direto resultante, o qual foi obtido pela análise de eventos e calculado pela integração da área sob o hidrograma, subtraindo o escoamento básico. O método usado para a separação do escoamento básico foi o da declividade constante (Chow et al., 1988).

## São Manuel, SP.

O município de São Manuel-SP está localizado na região centro-sul do estado de São Paulo, compreendendo as coordenadas: 22°43' de latitude sul e 48°34' de longitude oeste. A elevação média é de 709 m. O clima regional é do tipo mesotérmico úmido (Cfa), conforme classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 1300 mm (SIGRH, 2008).

A bacia hidrográfica Paraíso (WPAR) é coberta por eucalipto e mata Ciliar (10,53%), pastagem com capim Brachiária (58,87%), café (7,47%) e cana-de-açúcar em contorno (23,13%). O solo da bacia é um Latossolo Vermelho textura média (Amorim, 1995). As principais características físicas da bacia são apresentadas na Tabela 3.10.

O nível das vazões foi registrado com linígrafo instalado em um vertedor retangular. A precipitação foi registrada com pluviógrafo. O período de monitoramento compreendeu os anos de 1984 a 1986. Os dados usados neste estudo foram os publicados por Amorim (1995), totalizando vinte e seis eventos de chuva total e escoamento superficial direto resultante.

Tabela 3.10. Principais características físicas da bacia WPAR.

<b>Características físicas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Área da bacia	km <sup>2</sup>	3,268
Perímetro da bacia	m	8825
Comprimento do percurso mais longo do escoamento	m	2520
Índice de Compacidade	-	1,38
Fator de Forma	-	0,51
Declividade média da bacia	%	9,0

Fonte: Silva Júnior (1990).

## Brasília, DF.

A bacia do córrego Capetinga (WCAP) localiza-se na região Centro-Oeste do Brasil, a sudeste do Distrito Federal, com centro geográfico aproximadamente no ponto 47°56' de



longitude oeste e 15°27' de latitude sul. O clima na região do Distrito Federal enquadra-se entre os tipos tropical de savana e temperado chuvoso de inverno seco, caracterizado pela existência nítida de duas estações: uma chuvosa e quente, entre outubro e abril, e outra fria e seca, entre maio e setembro. As principais características físicas desta bacia são apresentadas na Tabela 3.11.

Segundo Silva e Oliveira (1999) o uso do solo da bacia é composto de: (a) 20% de vegetação típica do cerrado sobre solo argiloso profundo e bem estruturado, com subsolo de boa permeabilidade; (b) 20% coberta com árvores menos densas, com gramíneas subjacentes, sobre solo argiloso pouco profundo e bem estruturado, com subsolo de permeabilidade regular; (c) 50% coberta por gramíneas e arbustos esparsos sobre solos rasos, com subsolo de baixa permeabilidade, localizados em relevo ondulado; (d) 10% de mata ciliar sobre solo argiloso e bem estruturado.

O período de monitoramento compreendeu os anos de 1996 a 2003. Os dados usados neste estudo foram os publicados por Alencar et al. (2006), totalizando 229 eventos de chuva total e escoamento superficial direto resultante.

Tabela 3.11. Principais características físicas da bacia WCAP.

<b>Características físicas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Área da bacia	km <sup>2</sup>	9,62
Perímetro da bacia	m	12000
Comprimento do percurso mais longo do escoamento	m	3000
Índice de Compacidade	-	1,09
Fator de Forma	-	1,07
Declividade média da bacia	%	3,3

Fonte: Silva e Oliveira (1999).

### **3.2.2. Dados de condutividade hidráulica saturada**

Os dados de condutividade hidráulica saturada para perfis de solos do Brasil foram obtidos através de uma pesquisa bibliográfica na base de dados Scielo e na base de dados das bibliotecas de universidades do Brasil. Dessa pesquisa foram selecionados 58 perfis de solos,

cujos dados são exclusivamente de periódicos, teses e dissertações. Os dados selecionados incluem para cada horizonte ao longo do perfil a condutividade hidráulica saturada, as classes texturais, o tipo de horizonte e a classificação pedológica do perfil. A Tabela 3.12 apresenta o número do perfil, a cidade ou a região de amostragem, a classificação do solo e a fonte dos dados. No Apêndice A são apresentadas as informações selecionadas para cada um dos 58 perfis.

Tabela 3.12. Perfis de solos com medições de condutividade hidráulica saturada.

<b>Perfil</b>	<b>Solo</b>	<b>Local</b>	<b>Fonte</b>
1	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
2	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
3	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Epidistrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo suave ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
4	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Epidistrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
5	Brunizem Avermelhado, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
6	Brunizem Avermelhado, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
7	Glei Pouco Húmico distrófico Tb, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo suave ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
8	Glei Pouco Húmico distrófico Tb, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo suave ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
9	Solo Aluvial Eutrófico Tb, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo plano	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
10	Solo Aluvial Eutrófico Tb, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo plano	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
11	Solo Litólico Eutrófico Ta, A chernozêmico, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)

(continua)

Tabela 3.12. Perfis de solos com medições de condutividade hidráulica saturada (continuação).

Perfil	Solo	Local	Fonte
12	Solo Litólico Eutrófico Ta, A chernozêmico, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito	Região de Marília, SP.	Zimback (1993)
13	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, relevo ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback e Carvalho (1996)
14	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Epidistrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, relevo suave ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback e Carvalho (1996)
15	Cambissolo Eutrófico, A chernozêmico, textura média, relevo ondulado, substrato arenito	Região de Marília, SP.	Zimback e Carvalho (1996)
16	Glei Pouco Húmico distrófico Tb, A moderado, textura arenosa, relevo suave ondulado	Região de Marília, SP.	Zimback e Carvalho (1996)
17	Solo Aluvial Eutrófico Tb, A moderado, textura arenosa, relevo plano	Região de Marília, SP.	Zimback e Carvalho (1996)
18	Solo Litólico Eutrófico Ta, A chernozêmico, textura arenosa, relevo ondulado, substrato arenito	Região de Marília, SP.	Zimback e Carvalho (1996)
19	Latossolo Roxo ácrico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
20	Latossolo Roxo ácrico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
21	Latossolo Roxo ácrico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
22	Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
23	Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
24	Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
25	Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
26	Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
27	Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura argilosa	Região de Guaíra, SP.	Tognon (1991)
28	Latossolo Amarelo coeso, A moderado, textura argilosa	Região de São Miguel, AL.	Silva e Ribeiro (1997)
29	Latossolo Amarelo coeso, A moderado, textura argilosa	Região de São Miguel, AL.	Silva e Ribeiro (1997)
30	Latossolo Amarelo coeso, A moderado, textura argilosa	Região de São Miguel, AL.	Silva e Ribeiro (1997)
31	Latossolo Amarelo coeso, A moderado, textura argilosa	Região de São Miguel, AL.	Silva e Ribeiro (1997)
32	Cambissolo distrófico (epialico), Tb, A moderado, textura muito argilosa, fase campo cerrado, relevo ondulado, substrato filito	Região de São João Del Rei, MG.	Santos et al. (1998)

(continua)

Tabela 3.12. Perfis de solos com medições de condutividade hidráulica saturada (continuação).

<b>Perfil</b>	<b>Solo</b>	<b>Local</b>	<b>Fonte</b>
33	Latossolo Amarelo coeso argissólico	Região de Sapeaçú, BA.	Paiva et al. (2000)
34	Argissolo Amarelo coeso	Região de Sapeaçú, BA.	Paiva et al. (2000)
35	Argissolo Acinzentado	Região de Sapeaçú, BA.	Paiva et al. (2000)
36	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa	Fazenda Itabaiana, Açailândia, MA.	Lumbreras (1996)
37	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa	Fazenda Itabaiana, Açailândia, MA.	Lumbreras (1996)
38	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa	Fazenda Itabaiana, Açailândia, MA.	Lumbreras (1996)
39	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa	Fazenda Itabaiana, Açailândia, MA.	Lumbreras (1996)
40	Argissolo Amarelo abrupto fragipânico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta subperenefólia, relevo plano	Usina Coruripe, Coruripe, AL.	Maia & Ribeiro (2004)
41	Argissolo Amarelo abrupto fragipânico, A moderado, textura média/argilosa	Usina Coruripe, Coruripe, AL.	Maia & Ribeiro (2004)
42	Argissolo Amarelo abrupto fragipânico, A moderado, textura média/argilosa	Usina Coruripe, Coruripe, AL.	Maia & Ribeiro (2004)
43	Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico	Centro Experimental da ESALQ/USP, Piracicaba, SP.	Teixeira (2001)
44	Latossolo Vermelho Escuro Distrófico, álico, A moderado, textura argilosa, fase transição floresta/cerrado, relevo plano	Brasília, DF.	Cordeiro (1997)
45	Latossolo Vermelho Escuro Distrófico, epiálico, A moderado, textura argilosa, fase cerrado, relevo plano	Brasília, DF.	Cordeiro (1997)
46	Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, epiálico, A moderado, textura média, fase cerrado, relevo plano	Brasília, DF.	Cordeiro (1997)
47	Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, epiálico, A moderado, textura média, fase cerrado, relevo plano	João Pinheiro, MG.	Cordeiro (1997)
48	Latossolo Amarelo Distrófico extremamente profundo	Estação Experimental da Embrapa Amazônia Ocidental.	Marques et al. (2004)
49	Planossolo	Centro Experimental da UFSM, Santa Maria, RS.	Stefani et al. (1990)
50	Latossolo Amarelo Distrófico	Parintins, AM.	Marques et al. (2008)

(continua)

Tabela 3.12. Perfis de solos com medições de condutividade hidráulica saturada (continuação).

<b>Perfil</b>	<b>Solo</b>	<b>Local</b>	<b>Fonte</b>
51	Latossolo Amarelo Distrófico	Parintins, AM.	Marques et al. (2008)
52	Latossolo Amarelo Distrófico	Parintins, AM.	Marques et al. (2008)
53	Latossolo Vermelho Distrófico	Parintins, AM.	Marques et al. (2008)
54	Latossolo Vermelho Distrófico argissólico	Parintins, AM.	Marques et al. (2008)
55	Latossolo Vermelho Distrófico	Parintins, AM.	Marques et al. (2008)
56	Neossolo Quartzarênico Órtico gleico	Campos dos Goytacazes, RJ.	Souza (2004) e Bernardes (2005)
57	Cambissolo Háplico Tb Distrófico gleico	Campos dos Goytacazes, RJ.	Souza (2004) e Bernardes (2005)
58	Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico latossólico	Campos dos Goytacazes, RJ.	Souza (2004) e Bernardes (2005)

### 3.3. Elaboração de critérios para classificação hidrológica de solos

Para dar um caráter prático e manter a consistência na escolha dos atributos dos solos que podem atuar como base na inferência sobre seu comportamento hidrológico procurou-se atender principalmente para: (a) disponibilidade de informações em boletins de levantamento pedológico; (b) possibilidade de identificar a variabilidade do atributo nas legendas dos mapas, ou seja, na classificação dos solos; (c) ter relações com o comportamento físico-hídrico dos solos. Seguindo estas observações foram escolhidos os seguintes atributos de solos para formular critérios de classificação hidrológica de solos tropicais brasileiros:

- **Camada Restritiva.** Uma camada restritiva é uma camada que reduz significativamente ou impede o movimento descendente da água no interior do solo, isto é, reduz a condutividade hidráulica saturada. Então, uma camada restritiva como definida é uma limitação quanto à permeabilidade. O impacto dessa camada sobre o escoamento superficial depende da profundidade de sua ocorrência e da limitação proporcionada à percolação de água no solo, isto é, moderada ou forte. Segundo

Oliveira (2005) os horizontes litoplântico, petroplântico, petrocálcico, plântico, plântico com caráter sódico e plácico, assim como o contato lítico, o ortstein, o duripã e o fragipã são de limitação forte. O horizonte coeso, a mudança textural abrupta e o horizonte plântico são de limitação moderada. O NRCS (2007) classifica as camadas restritivas de limitação forte como camadas quase impermeáveis, as quais podem ser consideradas como impermeáveis para os propósitos da classificação hidrológica de solos.

- Lençol d'água subterrâneo e lençol d'água suspenso. Se seus níveis se encontrarem dentro de 100 cm de profundidade durante algum período do ano (estação úmida), haverá o surgimento de condições de pouca drenagem devido à saturação do solo por capilaridade, o que favorecerá o escoamento superficial.
- Atividade da argila do horizonte subsuperficial. Uma medida da atividade da argila é a capacidade de troca de cátions da fração argila (T). Solos com elevada atividade da fração argila ( $T > 27 \text{ cmol}_c/\text{kg}$  de argila) são solos com significativo potencial de contração-expansão. Estes solos são classificados como Ta (argila de atividade alta) ou como vérticos (ou vertissólicos). Os representantes extremos da classe são os Vertissolos que possuem elevado potencial de contração-expansão e condutividade hidráulica saturada muito baixa. A capacidade de troca de cátions da caulinita (mineral de argila do grupo 1:1) em geral varia de 1 a 10  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ , da montemorilonita (mineral de argila do grupo 2:1) de 80 a 120  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ , da vermiculita (mineral de argila do grupo 2:1) de 120 a 150  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ , da matéria orgânica de 100 a 300  $\text{cmol}_c/\text{kg}$  (OLIVEIRA, 2005) e dos óxidos hidratados em torno de 4  $\text{cmol}_c/\text{kg}$  (FREIRE, 2006).
- Propriedades Ácricas. Característica de solos altamente intemperizados com considerável teor de óxidos e hidróxidos de ferro (hematita, goetita), óxidos de alumínio (gibbsita) e caulinita. Devido à composição mineralógica são solos de atividade coloidal muito baixa e apresentam em geral elevada porosidade e boa

condutividade hidráulica, mesmo aqueles muito argilosos [ $> 60\%$  de argila] (OLIVEIRA, 2005).

- Óxidos de Ferro. Óxidos de ferro são compostos inorgânicos que com sua ação cimentante produzem pequenos agregados bastante estáveis os quais são às vezes chamados de “pseudo-areias” em certos solos de regiões úmidas e quentes (BRADY e WEIL, 2000). Solos ricos em óxidos de ferro possuem em geral boa porosidade e boa condutividade hidráulica saturada.
- Classe textural. A classe textural fornece uma idéia da distribuição do tamanho de partículas que constituem a fração terra fina do solo. Em geral, uma classe textural composta predominantemente pela fração areia possui maior condutividade hidráulica saturada do que uma classe textural composta predominantemente pela fração argila. No entanto, exceções a essa generalização ocorrem devido à estrutura do solo e a atividade da fração argila.

Os principais atributos selecionados e apresentados para desenvolver os critérios de classificação hidrológica de solos são aqui classificados em principais e secundários. Os atributos principais são aqueles que podem por si só em alguns casos definir o grupo hidrológico de um solo em função de sua profundidade e limitação. Estes incluem as camadas restritivas de limitação forte e o lençol freático. Os atributos secundários são aqueles que podem por si só definir um grupo hidrológico de solo somente na ausência dos atributos principais dentro de uma profundidade limite, tomada como 100 cm. Eles são usados como informações complementares aos atributos primários para gerar critérios de classificação. Os atributos secundários incluem, além das camadas restritivas de limitação moderada, a atividade da fração argila, as propriedades ácricas, o teor de óxidos de ferro e a classe textural.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006) informa no quarto nível categórico (subgrupo) a profundidade onde se inicia o horizonte subsuperficial B de solos que apresentam horizontes A e E de textura arenosa e mudança textural abrupta (camada restritiva de limitação moderada), ou seja, nos solos dos subgrupos abruptos o horizonte B se

inicia a menos de 50 cm, nos arênicos entre 50 e 100 cm e nos espessoarênicos a mais de 100 cm. Também apresenta definições precisas de solos rasos (líticos) e pouco profundos (lépticos). Os solos rasos apresentam contato lítico a menos de 50 cm de profundidade e nos solos pouco profundos esse contato se encontra entre 50 e 100 cm de profundidade. Com relação à presença do lençol subterrâneo, o SiBCS usa o termo hidromórfico no segundo e no terceiro nível categórico, o termo hidro-hiperespesso no terceiro nível categórico e o termo gleissólico no quarto nível categórico para indicar a presença de água proveniente do lençol subterrâneo. A ordem dos Gleissolos, por definição, compreende solos que se encontram permanente ou periodicamente saturados por água.

O termo hidromórfico é usado no segundo nível categórico com a ordem dos Vertissolos para indicar a presença do lençol subterrâneo dentro de 50 cm de profundidade ou entre 50 e 100 cm. No terceiro nível categórico o termo hidromórfico é aplicado ao grande grupo dos Neossolos Quartzarênicos para indicar a presença do lençol subterrâneo permanente ou durante algum tempo na maioria dos anos dentro de 50 cm de profundidade ou dentro de 150 cm de profundidade durante a estação seca. Para a ordem dos Espodossolos o termo hidromórfico indica a presença do lençol subterrâneo dentro de 100 cm de profundidade. O termo gleissólico é usado no quarto nível categórico para indicar horizonte glei dentro de 150 cm de profundidade (em posição não diagnóstica para Gleissolos) ou mais raso quando coincidir com horizonte diagnóstico plânico. Isso indica a presença do lençol subterrâneo dentro de 150 cm de profundidade. O termo hidro-hiperspesso é aplicado ao grande grupo dos Espodossolos Humilúvicos para indicar a presença do lençol d'água subterrâneo dentro de 100 cm de profundidade.

Considerando as indicações de profundidades do SiBCS para as camadas restritivas e para o lençol subterrâneo, e sabendo que os atributos primários têm prioridade na decisão sobre os atributos secundários, a qual depende também da combinação de ambos, as possibilidades de classificação hidrológica de um solo definidas com base apenas nos atributos primários e nas camadas restritivas moderadas são apresentados na Tabela 3.13. Estas possibilidades formam a base inicial para o desenvolvimento dos critérios de classificação hidrológica de solos que são apresentados no item 4.1.



Tabela 3.13. Base inicial para desenvolver critérios de classificação hidrológica de solos.

Profundidade do lençol d'água	Profundidade da camada restritiva		Grupo Hidrológico de Solo
	forte	moderada	
> 100 cm	> 100 cm	> 100 cm	A, B, C ou D
		50 e 100 cm	B ou C
		≤ 50 cm	C ou D
	50 e 100 cm	---	C ou D
	≤ 50 cm	---	D
≤ 100 cm	---	---	D

### 3.4. Aplicação dos critérios propostos e dos critérios do NRCS (2007) para classificação hidrológica de alguns solos brasileiros

A classificação hidrológica de solos do NRCS (2007) usa medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil e a profundidade da camada impermeável como critérios de classificação, conforme critérios apresentados na Tabela 2.8. Para os solos do Brasil se dispõe de poucos dados de condutividade hidráulica saturada, o que impede uma aplicação direta da classificação proposta pelo NRCS (2007). Os critérios de classificação hidrológica desenvolvidos neste estudo diferem desta, pois a classificação proposta usa critérios baseados em atributos dos solos que influenciam na sua condutividade hidráulica, ou seja, em atributos que substituem a condutividade hidráulica saturada para classificar hidrológicamente um solo. Estes podem ser identificados na classificação dos solos ou mais precisamente nos boletins de levantamento de solos. Dessa forma, a classificação proposta visa à praticidade e viabilidade de aplicação. Assim, a comparação dos resultados da aplicação das duas classificações hidrológicas tem por objetivo verificar se a classificação proposta neste trabalho pode ser considerada equivalente a classificação hidrológica proposta pelo NRCS (2007).

Para aplicar os critérios de classificação hidrológica propostos neste estudo e os critérios do NRCS (2007) foram usadas informações de 58 perfis de solos do Brasil, com dados de condutividade hidráulica saturada, que estão citados e referenciados na Tabela 3.12. Para estes perfis, no Apêndice A, são apresentados para cada horizonte ou camada a simbologia do

horizonte, a profundidade inicial e final do horizonte, a classe textural do USDA (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993) e da Embrapa (1979), e a condutividade hidráulica saturada.

O atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) define 13 ordens de solos: Argissolos; Cambissolos; Chernossolos, Espodossolos; Gleissolos; Latossolos; Luvisolos; Neossolos; Nitossolos; Organossolos; Planossolos; Plintossolos; e Vertissolos. As ordens dos Latossolos, dos Argissolos e dos Neossolos representam cerca de 70 % da área territorial brasileira, sendo, portanto, as ordens mais comuns e presentes em todos os estados da federação.

Devido a similaridades genéticas entre solos de mesma ordem, a comparação dos resultados da aplicação das classificações hidrológicas proposta e do NRCS (2007) foram feitas para cada ordem de solo. Os 58 perfis analisados estão distribuídos em 8 das 13 ordens apresentadas como segue:

- Argissolos: 12 perfis (1, 2, 3, 4, 13, 14, 34, 35, 40, 41, 42 e 58);
- Cambissolos: 2 perfis (32 e 57);
- Chernossolos: 3 perfis (5, 6 e 15);
- Gleissolos: 3 perfis (7, 8 e 16);
- Latossolos: 29 perfis (19 a 31, 33, 36 a 39, 44 a 48 e 50 a 55);
- Neossolos: 7 perfis (9 a 12, 17, 18 e 56);
- Nitossolos: 1 perfil (43);
- Planossolos: 1 perfil (49).

### **3.5. Procedimentos para calibração do CN**

Se pares de eventos observados de chuva e escoamento superficial direto resultante estiverem disponíveis, o parâmetro CN pode ser calibrado. A pesquisa bibliográfica sobre o assunto revelou seis métodos que usam diretamente ou derivam da relação chuva-escoamento do Método do CN: (a) “National Engineering Handbook”; (b) Mínimos Quadrados; (c) Curva de

Frequência; (d)  $P/S > 0,46$ ; (e) Assintótico; (f) Frequência Log-normal. Estes métodos foram apresentados e descritos no item 2.3. Neste item apenas o procedimento de cálculo usado com cada técnica de calibração será apresentado.

#### (a) Método do “National Engineering Handbook” – NEH (SCS, 1972)

Método usado para desenvolvimento das tabelas do CN que consiste em plotar os valores de chuva ( $P$ ) e escoamento superficial direto ( $Q$ ) no sistema cartesiano  $P$  versus  $Q$  com a família de curvas do parâmetro CN. O valor mediano do CN era selecionado por inspeção visual, sendo escolhido o CN que dividia os dados plotados em dois grupos iguais, ou seja, o CN mediano. Assim, para cada par de eventos da série hidrológica a retenção potencial máxima pode ser calculada com a equação (Hawkins, 1973):

$$S = 5 \cdot \left( P + 2 \cdot Q - \sqrt{4 \cdot Q^2 + 5 \cdot P \cdot Q} \right) \text{ para } 0 \leq P \leq Q \quad (3.1)$$

sendo  $S$  a retenção potencial máxima,  $P$  a chuva e  $Q$  o escoamento superficial direto para cada evento, todos em milímetros. O CN para cada valor de  $S$  foi calculado por:

$$\text{CN} = \frac{25400}{S + 254} \quad (3.2)$$

O CN de referência foi tomado como a mediana dos valores do CN.

#### (b) Método dos Mínimos Quadrados – LS

No problema de calibração do CN, o método dos mínimos quadrados consiste em procurar o valor para o parâmetro  $S$  que minimiza a função objetivo:

$$FO(S) = \sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i)^2 \quad (3.3)$$

na qual  $Q_i$  é o escoamento superficial direto observado para o evento  $i$  e  $\hat{Q}_i$  é o escoamento superficial direto para o evento  $i$  calculado com:

$$\hat{Q}_i = \frac{(P_i - 0,2 \cdot S)^2}{P_i + 0,8 \cdot S} \text{ para } P_i \geq 0,2 \cdot S, \text{ caso contrário } \hat{Q}_i = 0 \quad (3.4)$$

na qual  $P_i$  é a chuva total do evento  $i$ . O melhor valor do parâmetro  $S$  calibrado para os  $N$  eventos é convertido para o CN de referência com a Equação 3.2. O programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009) foi usado para o ajuste não linear da Equação 3.4. As medidas estatísticas para verificar a qualidade do ajuste foram o índice de eficiência e o erro padrão. O índice de eficiência (EF) é calculado com:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.5)$$

Na Equação 3.5 o  $N$  é o número de eventos da amostra,  $\hat{y}_i$  é o valor estimado da variável critério,  $y_i$  é o valor medido da variável critério e  $\bar{y}$  é a média dos valores medidos da variável critério. Para modelos lineares não tendenciosos o índice de eficiência ficará entre zero e um, enquanto que para modelos não lineares ele pode resultar em valores negativos mesmo quando o modelo não for tendencioso (MCCUEN et al., 2006).

O erro padrão (SE) é calculado com:

$$SE = \sqrt{\frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{N - p}} \quad (3.6)$$

na qual  $N$  o número de eventos da amostra,  $p$  o número de parâmetros estimados a partir da amostra,  $\hat{y}_i$  o valor estimado da variável critério e  $y$  o valor medido da variável critério.

### (c) Método da Curva de Frequência – FM (HJELMFELT, 1980; 1991)

Hjelmfelt (1991) apresentou um método analítico para estimar o melhor  $S$  (ou CN) para reproduzir a distribuição do escoamento superficial direto a partir da distribuição de frequência da chuva. Este método supõe que a distribuição do parâmetro  $S$  é log-nomal e que o melhor valor para o parâmetro  $S$  é a média dos logaritmos de  $S$ . O procedimento para o cálculo segue a seqüência:

- Calcular o potencial máximo de retenção para cada par de eventos de chuva e escoamento superficial direto com a Equação 3.1;
- Calcular o logaritmo dos valores de  $S$ ;
- Calcular a média dos logaritmos de  $S$  com a equação:

$$\bar{S}_{\log} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\log(S_i)}{N} \right) \quad (3.7)$$

- Calcular a média geométrica dos valores de  $S$ :

$$GM = 10^{\bar{S}_{\log}} \quad (3.8)$$

- Calcular o CN de referência com a Equação 3.2 substituindo  $S$  por  $GM$ , ou seja, usando o valor da média geométrica dos valores de  $S$ .

### (d) Método $P/S > 0,46$ (HAWKINS et al., 1985)

O procedimento para este método consiste em: (1) Colocar todos os pares de eventos de chuva e escoamento superficial direto em ordem decrescente pela chuva; (2) Calcular  $S$  com a Equação 3.1 para todos os eventos; (3) Considerar a maior chuva observada; (4) Verificar se  $P/S > 0,46$ ; 5. Caso  $P/S$  seja maior do que 0,46 deve-se incluir a próxima maior chuva observada e calcular a média dos valores de  $S$  para os eventos considerados. Caso contrário, o evento deve ser eliminado do cálculo. Voltar à etapa anterior e repetir o ciclo até que a última  $P$  aceita

dividida pela média dos valores de  $S$  seja maior que 0,46. Uma vez definido o valor de referência para o parâmetro  $S$ , o valor do CN de referência será obtido via Equação 3.2. Para a realização deste procedimento de tentativa e erro foi criado um script no ambiente de programação do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009).

### (e) Método Assintótico – AS (HAWKINS, 1993)

O procedimento de aplicação do método Assintótico consiste de duas partes, uma gráfica e outra analítica. A primeira parte, a gráfica, serve para verificar qual é o comportamento CN-P para a escolha de um dos modelos analíticos, Padrão ou Violento (ver item 2.3.5), a ser usado na calibração do CN para um determinado conjunto de dados. Se os dados apresentam comportamento Padrão ou Complacente, o modelo Padrão é usado:

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty}) \cdot e^{-k \cdot P} \quad (3.9)$$

sendo  $k$  e  $CN_{\infty}$  os parâmetros de ajuste. O  $CN_{\infty}$  é o valor tomado como CN de referência.

Para bacias apresentando comportamento Violento, o modelo usado é:

$$CN(P) = CN_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot P}) \quad (3.10)$$

O programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009) foi usado para o ajuste não linear das Equações 3.9 e 3.10. As medidas estatísticas para verificar a qualidade do ajuste foram o índice de eficiência (Equação 3.5), o erro padrão (Equação 3.6) e a estabilidade calculada com a equação:

$$STB = \left( \frac{100 - CN(P90)}{100 - CN_{\infty}} \right) \quad (3.11)$$

sendo  $CN(P90)$  o CN calculado com a Equação 3.9 ou 3.10 após calibração,  $P90$  o valor da chuva contida na amostra que é maior do que 90% dos valores observados e  $CN_{\infty}$  o valor assintótico do parâmetro CN, o qual é tomado como o CN de referência. Assim, pode-se dizer que a estabilidade é uma medida da confiança sobre o valor calibrado do CN, ou seja, quanto mais próximo de um for a estabilidade mais confiável será o valor do  $CN_{\infty}$ .

#### (f) Método da Frequência Log-normal – LN (SCHNEIDER e MCCUEN, 2005)

O procedimento deste método consiste em calcular o logaritmo da chuva ( $P$ ) e do escoamento superficial direto ( $Q$ ) para cada par de eventos. O valor de  $S$  é obtido com a Equação 3.2 usando o inverso das médias dos logaritmos de  $P$  e  $Q$ . Segundo Schneider e McCuen (2005) este procedimento reduz o desequilíbrio do peso atribuído aos grandes valores de chuva uma vez que os logaritmos das chuvas reduzem todos os valores proporcionalmente.

### **3.6. Análise dos métodos de calibração do parâmetro CN**

O objetivo central dessa análise é avaliar os seis métodos de calibração do parâmetro CN, apresentados nos itens 2.3 e 3.5, e escolher os mais adequados para determinar o valor do CN de referência para 6 bacias hidrográficas e para 43 parcelas experimentais, cujo nome, local, período de observação e número de eventos disponíveis foram apresentados no item 3.2.1. Por convenção, a partir deste ponto as parcelas experimentais também serão referidas como bacias hidrográficas.

Por se tratar de uma análise para a escolha de métodos de calibração do CN, não há necessidade de serem usadas todas as bacias. No entanto, para avaliar o potencial de calibração de cada método com as principais representações de cada comportamento do CN com relação a chuva total (ver item 2.3.5), parece adequado selecionar um número igual de bacias para cada comportamento CN-P. Este critério minimiza o esforço computacional e elimina o efeito do número de representações de um determinado comportamento CN-P (Padrão, Complacente e

Violento) na análise dos resultados, permitindo uma análise da influência de cada comportamento CN-P sobre a calibração do CN. Assim, 15 bacias com as cinco melhores representações de cada comportamento CN-P foram escolhidas. O limite de cinco bacias foi definido pelo comportamento Violento, o qual foi observado em apenas cinco das 49 bacias.

Embora os métodos de calibração do CN não tenham sido propostos para uso com mesmo tratamento de dados (i.e., ordenados ou naturais) e para a mesma série hidrológica (i.e., total, parcial ou anual), nesta análise considerou-se que todos os métodos de calibração são aplicáveis às séries hidrológicas total e parcial. Além disso, foram considerados dois modos de aplicação do Método do CN, a Frequência Igualada e a Simulação de Eventos. O primeiro modo de aplicação usa o Método do CN para reproduzir a curva de frequência do escoamento a partir da curva de frequência da chuva. O segundo modo de aplicação do Método do CN consiste em simular eventos, ou seja, o método tenta reproduzir o escoamento observado a partir da chuva causativa. Esta aplicação reconhece a dispersão dos valores observados em torno da tendência central.

Em resumo, nesta análise procurou-se verificar qual método de calibração determinaria os melhores CNs para as 15 bacias selecionadas (cinco melhores representações de cada comportamento do CN com relação à chuva total – Padrão, Complacente e Violento) em função do tratamento dos dados (ordenados e naturais) e do modo de aplicação do Método do CN (Frequência Igualada e Simulação de Eventos).

### **3.6.1. Escolha das bacias**

Para todas as bacias hidrográficas foi construído um gráfico da variação do CN com relação à chuva total, isto é, um gráfico de P versus CN. Para isto as séries de chuva e escoamento superficial direto resultante foram classificadas separadamente em ordem crescente e reagrupadas formando pares de eventos de mesma frequência, ou seja, formando a série de eventos ordenados. Foram eliminados da série hidrológica os pares de eventos naturais com escoamento nulo, ou seja, só foram consideradas chuvas maiores que a abstração inicial do solo.



Na série ordenada a chuva e o escoamento possuem a mesma ordem de classificação e o escoamento superficial direto não é necessariamente resultante da chuva que corresponde a sua ordem de classificação. O CN calculado para cada par de eventos chuva-escoamento desta série ordenada é plotado contra a chuva total (abscissa) para a visualização do comportamento CN-P apresentado pela bacia. Para cada tipo de comportamento CN-P definido por Hawkins (1993) foram escolhidas cinco bacias com as melhores representações. O critério usado foi a inspeção visual da tendência do CN apresentar valores aparentemente estáveis com o aumento da magnitude da chuva (comportamentos Padrão e Violento) e de um decréscimo do CN com o aumento da magnitude da chuva (comportamento Complacente), conforme exemplos apresentados no item 2.3.5.

### **3.6.2. Critério para escolha dos métodos de calibração**

A medida estatística usada para definir qual o melhor CN e conseqüentemente o método de calibração mais adequado foi o índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970), o qual é uma medida da redução da variância devido ao modelo usado. A variável usada como critério de comparação foi o escoamento superficial direto. Os métodos de calibração selecionados após esta análise foram aplicados a todas as bacias para determinar o CN de referência. Os métodos escolhidos e os resultados obtidos desta análise são apresentados no item 4.3.

### **3.7. Determinação do CN de referência**

Apesar de o método ser aplicado às condições brasileiras, a estimativa do CN vem sendo baseada em valores tabelados e nas definições dos grupos hidrológicos de solo fundamentados em experiências realizadas nos EUA. A necessidade de se estabelecer valores locais de referência para o parâmetro CN é evidente e não se resume às condições brasileiras. Vários estudos têm sido feito ao longo dos anos para verificar os valores já tabelados ou para estender a metodologia às condições locais que não foram consideradas no desenvolvimento original do método (PONCE e

HAWKINS, 1996) tais como cana-de-açúcar e abacaxi (COOLEY e LANE, 1982), solos arenosos nus e encrostados (SHARMA, 1987), efeitos do resíduo de colheita e preparo do solo (RAWLS et al., 1980; SOUZA et al., 1995) e áreas urbanas (RAWLS et al., 1981; GERMANO e TUCCI, 1995; TASSI et al., 2006).

A falta de dados observados de chuva e vazão em pequenas bacias hidrográficas com um único complexo hidrológico é a maior dificuldade para se obter valores locais de referência para o parâmetro CN. Neste trabalho serão determinados CNs de referência para solo nu (Campinas-SP, Mococa-SP, Sumé-PB, Planaltina-DF e Lajes-SC), para solo sem cultivo (Campinas-SP, Sumé-PB e Planaltina-DF), para milho (Campinas-SP e Mococa-SP), para soja e trigo em rotação (Campinas-SP e Lajes-SC), para cana-de-açúcar (Campinas-SP), para eucalipto (Bofete-SP e Aracruz-ES), para Caatinga (Sumé-PB) e para Cactos (Sumé-PB). Com isso, esta etapa da pesquisa contribuirá para, no futuro, uma possível adaptação ou elaboração de uma tabela de valores de referência para o CN de acordo com as condições brasileiras.

### **3.7.1. Critérios para calibração e escolha do CN de referência**

Os métodos escolhidos para calibrar o parâmetro CN foram aplicados as séries hidrológicas de chuva e escoamento superficial direto para determinar o CN de cada bacia. Nesta aplicação não foi considerada nenhuma restrição quanto ao valor mínimo do evento de chuva a ser incluído na análise, como sugerido por Hawkins et al. (2002). No entanto, foram considerados na série hidrológica para calibrar o CN todos os eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero.

Como o objetivo da calibração neste estudo é o uso do Método do CN para projeto, isto é, para estimar o escoamento superficial de mesma frequência da chuva de projeto, a preferência para o CN de referência para uma determinada bacia será dada ao CN calibrado que melhor reproduzir a distribuição de frequência do escoamento superficial direto a partir da distribuição de frequência da chuva. Contudo, esta avaliação não considera todos os eventos usados no processo de calibração, como foi feito no estudo comparativo dos seis métodos de calibração do

CN, ou seja, foram considerados na amostra apenas eventos com chuva causativa maior do que a abstração inicial para verificar o desempenho do Método do CN. Assim, quanto menor for o CN de referência mais reduzida será a amostra. Portanto, espera-se que a distribuição de frequência da chuva e do escoamento não seja alterada significativamente a ponto de não validar o parâmetro CN calibrado com todos os eventos disponíveis.

Assim, a comparação entre os dois valores calibrados para o CN de uma mesma bacia será baseada no índice de eficiência, no erro padrão e no erro médio. Estas medidas estatísticas são usadas para definir o CN de referência para cada bacia. O erro médio é calculado com a equação:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) \quad (3.12)$$

na qual  $N$  é o número de eventos da amostra,  $\hat{y}_i$  é o valor estimado da variável critério e  $y_i$  é o valor medido da variável critério.



## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Critérios propostos para classificação hidrológica de solos**

A classificação hidrológica de solos do NRCS (2007) usa medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil e a profundidade da camada impermeável como critérios de classificação. Conforme já ressaltado, para solos do Brasil, se dispõe de poucos dados de condutividade hidráulica saturada, o que impede uma aplicação direta da classificação proposta pelo NRCS (2007). Para minimizar a dificuldade de classificar um solo hidrológicamente, sem ter dados de condutividade hidráulica saturada, neste trabalho foi proposta uma classificação alternativa. Esta classificação hidrológica usa critérios baseados em atributos de solos que influenciam na sua condutividade hidráulica. Estes atributos podem ser identificados na classificação dos solos ou mais precisamente nos boletins de levantamento de solos. Dessa forma, a classificação proposta tem por objetivo a praticidade e viabilidade de aplicação.

No desenvolvimento dos critérios de classificação hidrológica de solos foram usados alguns atributos dos solos – camada restritiva, lençol d'água subterrâneo e suspenso, atividade da fração argila, propriedades ácricas, teor de óxidos de ferro e classe textural – que podem atuar como substitutos de propriedades hidráulicas para a inferência e classificação de seu comportamento hidrológico. Os atributos selecionados foram divididos em principais e secundários. Os atributos principais e as camadas restritivas moderadas foram usados para formar a base de classificação (ver Tabela 3.13 item 3.3), a qual mostra que para um solo ser classificado como A, ele não deve apresentar lençol freático ou qualquer camada restritiva até uma profundidade de 100 cm, ou para ser classificado como D, um solo pode apresentar camada

restritiva forte a profundidade menor ou igual a 50 cm, lençol d'água a profundidade menor ou igual a 100 cm, ou alguma combinação com os atributos secundários. Assim, a definição de cada grupo hidrológico de solo (GHS) pode ser estabelecida e os critérios de classificação hidrológica desenvolvidos. Na seqüência são apresentadas as definições dos grupos hidrológicos de solos.

Grupo Hidrológico A – São solos que possuem permeabilidade rápida e não apresentam dentro de 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso e camada restritiva forte ou moderada. Neste grupo podem ser incluídos solos arenosos, solos bastante intemperizados de textura média, argilosa ou muito argilosa, com teor de óxido de ferro elevado e/ou propriedades ácricas.

Grupo Hidrológico B – São solos que possuem permeabilidade moderadamente rápida e não apresentam dentro de 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso e camada restritiva forte, mas podem apresentar camada restritiva moderada entre 50 e 100 cm de profundidade. Neste grupo podem ser enquadrados solos bastante intemperizados de textura média, argilosa ou muito argilosa, com teor de óxido de ferro médio a baixo e sem propriedades ácricas, solos que apresentam ou mudança textural abrupta ou horizonte coeso ou horizonte plúntico entre 50 e 100 cm de profundidade e solos Tb com horizonte B textural ou B incipiente com caráter latossólico.

Grupo Hidrológico C – São solos que possuem permeabilidade moderadamente lenta e não apresentam dentro de 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso, mas podem apresentar camada restritiva forte entre 50 e 100 cm ou camada restritiva moderada dentro de 100 cm de profundidade. Este pode incluir solos arenosos e solos bastante intemperizados que apresentam camada restritiva forte entre 50 e 100 cm, solos Tb que podem apresentar ou mudança textural abrupta ou horizonte coeso ou horizonte plúntico dentro de 50 cm de profundidade, solos Ta que podem apresentar ou mudança textural abrupta ou horizonte coeso ou horizonte plúntico entre 50 cm e 100 cm de profundidade e solos Ta com horizonte B textural.

Grupo Hidrológico D – São solos que possuem permeabilidade lenta e podem ou não apresentar dentro de 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso, camada restritiva forte e moderada. Neste grupo está incluída uma variedade de solos, desde arenosos a argilosos, devido às condições limitantes presentes. Por exemplo, um solo de textura arenosa pode ser classificado

como D pela presença de lençol d'água subterrâneo a profundidade inferior a 100 cm ou por apresentar camada restritiva forte dentro de 50 cm de profundidade ou horizonte vértico sem apresentar qualquer camada restritiva ou lençol d'água dentro de 100 cm de profundidade.

As definições apresentadas acima para os grupos hidrológicos de solos são bastante gerais, portanto não devem ser usadas na prática da classificação hidrológica de solos. Para isso foram desenvolvidos critérios de classificação, seguindo as definições gerais propostas para os grupos hidrológicos, a base definida na Tabela 3.13 e as particularidades de cada ordem de solo de acordo com o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006). A combinação de todas essas informações resultou dezoito critérios de classificação hidrológica de solos, os quais são apresentados na Tabela 4.1.

O critério 1 foi baseado nos solos classificados como Neossolos Quartzarênicos e Latossolos (...) (...) Psamíticos, portanto solos não hidromórficos, bem drenados, de textura arenosa até pelo menos 100 cm de profundidade, a qual é a profundidade limite para os propósitos da classificação hidrológica de solos.

O critério 2 inclui solos de textura arenosa que apresentam mudança textural abrupta ou horizonte plíntico abaixo de 100 cm de profundidade. O termo usado pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006) para caracterizar essa ocorrência nos solos é “espesoarênico”. Portanto, esse critério foi baseado nos solos classificados como Argissolos (...) (...) espesoarênicos e Plintossolos Argilúvicos (...) espesoarênicos.

O critério 3 refere-se a solos bastante intemperizados, de textura média a muito argilosa, com pouca ou nenhuma diferenciação de textura ao longo do perfil e de baixa atividade coloidal, isto é,  $T < 17 \text{ cmol}_c/\text{kg}$  de argila. Os solos de referência para este critério são Latossolos Ácricos, Latossolos Férricos (teor de óxidos de ferro elevado) e Latossolos Perférricos (teor de óxidos de ferro muito elevado).

O critério 4 diz respeito aos solos que apresentam mudança textural abrupta ou horizonte plíntico ou horizonte coeso entre 50 e 100 cm de profundidade. O termo usado pelo SiBCS (Embrapa, 2006) para caracterizar solos com horizontes A e E de textura arenosa associados à

mudança textural abrupta ou horizonte plântico entre 50 e 100 cm é “arênico abruptico”. O termo “coeso” é usado para indicar a presença de tal limitação que em geral ocorre entre 30 e 70 cm de profundidade nos horizontes transicionais AB, B/A ou Bt. Os solos tomados como referência para este critério são Argissolos (...) (...) arênicos, Plintossolos Argilúvicos (...) arênicos, Argissolos (...) Distrocóses e Argissolos (...) Eutrocóses.

Tabela 4.1. Critérios propostos para classificação hidrológica de solos tropicais brasileiros.

Lençol d'água	Camada restritiva		Demais características diagnósticas	GHS	Critério	
	forte	moderada				
> 100 cm	> 100 cm	> 100 cm	- textura arenosa em todo o perfil	A	1	
			- textura arenosa ou média (< 20% de argila) até a camada restritiva	A	2	
			- textura média, argilosa ou muito argilosa, T < 17 cmol <sub>c</sub> /kg de argila, elevado teor de óxidos de ferro e/ou propriedades ácricas	A	3	
	50 e 100 cm	50 e 100 cm	50 e 100 cm	- textura arenosa ou média até a camada restritiva moderada e Tb (T < 27 cmol <sub>c</sub> /kg de argila)	B	4
				- textura média, argilosa ou muito argilosa, T < 17 cmol <sub>c</sub> /kg de argila, elevado teor de óxidos de ferro e/ou propriedades ácricas	B	5
				- textura arenosa ou média até a camada restritiva moderada e Ta (T ≥ 27 cmol <sub>c</sub> /kg de argila)	C	6
	≤ 50 cm	≤ 50 cm	≤ 50 cm	- textura arenosa/média, arenosa/argilosa, arenosa/muito argilosa, média/argilosa, média/muito argilosa ou argilosa/muito argilosa e Tb	C	7
				- textura média, argilosa ou muito argilosa até a camada restritiva moderada e T < 17 cmol <sub>c</sub> /kg de argila	C	8
				- textura arenosa/média, arenosa/argilosa, arenosa/muito argilosa, média/argilosa, média/muito argilosa ou argilosa/muito argilosa e Ta	D	9
	ausente	ausente	ausente	- textura argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa, Tb e razão textural menor do que 1,5	B	10
				- textura média/média, média/argilosa ou argilosa/muito argilosa e Tb	B	11
				- textura argilosa ou muito argilosa, T < 17 cmol <sub>c</sub> /kg de argila, baixo a médio teor de óxidos de ferro e sem propriedades ácricas	B	12
				- horizonte B incipiente e caráter latossólico	B	13
				- textura média/média, média/argilosa ou argilosa/muito argilosa e Ta	C	14
	50 e 100 cm	---	---	- textura média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa e horizonte vértico	D	15
- textura arenosa; textura média, argilosa ou muito argilosa e Tb; textura média (< 20 % de argila) e Ta				C	16	
≤ 50 cm	---	---	- textura média (≥ 20% de argila), argilosa ou muito argilosa e Ta	D	17	
			---	D	18	
≤ 100 cm	---	---	---	D	19	

Observações:

- 1 - Lençol d'água inclui o freático e o suspenso ou temporário.
- 2 - Camada restritiva forte inclui os horizontes litoplântico (concrecionário), petroplântico, petrocálcico e plântico, o contato lítico, o ortstein, o duripã e o fragipã.
- 3 - Camada restritiva moderada inclui a mudança textural abrupta e os horizontes coeso e plântico.
- 4 - T: Capacidade de Troca de Cátions da fração argila do horizonte subsuperficial sem desconto de carbono.
- 5 - Ta: Argila de alta atividade (T ≥ 27 cmol<sub>c</sub>/kg de argila).
- 6 - Tb: Argila de baixa atividade (T < 27 cmol<sub>c</sub>/kg de argila).



O critério 5 inclui os mesmos solos do critério 3, mas com um diferencial, a presença de horizonte coeso entre 50 e 100 cm de profundidade. Os solos de referência para este critério são Latossolos Amarelos Distrocoesos.

O critério 6 tem a mesma base do critério 4, mas difere na classificação da atividade da fração argila do horizonte subsuperficial, que deve ser alta. Os solos tomados como referência para este critério são Luvisolos (...) (...) arênicos.

O critério 7 diz respeito aos solos Tb que apresentam mudança textural abrupta ou horizonte plântico ou horizonte coeso dentro de 50 cm de profundidade. Os solos de referência para este critério são Argissolos (...) (...) abrupticos, Plintossolos Argilúvicos (...) abrupticos, Argissolos (...) Distrocoesos e Argissolos (...) Eutrocoesos.

O critério 8 inclui os mesmos solos do critério 3, mas com um diferencial, a presença de horizonte coeso dentro de 50 cm de profundidade. Os solos de referência para este critério são Latossolos Amarelos Distrocoesos.

O critério 9 tem a mesma base do critério 7, mas difere na classificação da atividade da fração argila do horizonte subsuperficial, que deve ser alta. Os solos tomados como referência para este critério são Argissolos (...) Ta (...) abrupticos, Luvisolos (...) (...) abrupticos e Chernossolos Argilúvicos Órticos Abrupticos.

O critério 10 está baseado no conceito da ordem dos Nitossolos, que são solos argilosos ou muito argilosos com pouco incremento de argila no horizonte subsuperficial resultando numa razão textural menor do que 1,5.

O critério 11 foi criado para incluir uma variedade de solos pertencentes à ordem dos Argissolos que possuem fração argila de baixa atividade e que, dentro dos 100 cm de profundidade, possuem textura média ou mais fina e não possuem qualquer camada restritiva ou lençol d'água. Com esse critério também podem ser incluídos solos pertencentes à ordem dos Cambissolos.

O critério 12 refere-se a solos bastante intemperizados, de textura média a muito argilosa, com pouca ou nenhuma diferenciação de textura ao longo do perfil, com baixo a médio teor de óxidos de ferro, ausência de propriedades ácricas e  $T < 17 \text{ cmol}_c/\text{kg}$  de argila. Os solos de referência para este critério são Latossolos (...) Distróficos ou Eutróficos ou Alumínicos típicos.

O critério 13 foi baseado única e exclusivamente nos solos com B incipiente, horizonte subsuperficial que sofreu pouca alteração física e química, com características morfológicas semelhantes as do horizonte subsuperficial latossólico. Os solos de referência para este critério são os Cambissolos (...) (...) latossólicos.

O critério 14 tem a mesma base do critério 11, mas difere na classificação da atividade da fração argila do horizonte subsuperficial, que deve ser alta. Esse critério inclui uma variedade de solos pertencentes à ordem dos Argissolos, dos Cambissolos, dos Chernossolos e dos Luvisolos, que possuem fração argila de alta atividade e não possuem dentro de 100 cm de profundidade qualquer camada restritiva ou lençol d'água. Como referências podem ser citados os Argissolos (...) Ta (...) típicos, Cambissolos (...) Ta (...) típicos, Chernossolos Argilúvicos (...) típicos e Luvisolos (...) Pálicos.

O critério 15 compreende solos com propriedades vérticas (vertissólicos) ou solos com horizonte vértico. Isso significa que estes solos possuem significativo a elevado potencial de contração e expansão. São referência deste critério os solos classificados como Cambissolos (...) (...) vertissólicos, Luvisolos (...) (...) vertissólicos, Chernossolos (...) (...) vertissólicos e os Vertissolos.

O critério 16 corresponde a solos de qualquer ordem, com fração argila de baixa atividade ou de alta atividade, mas com teor de argila inferior a 20 % para solos de textura média, e que apresentam camada restritiva forte entre 50 e 100 cm de profundidade. Este é o caso, por exemplo, de solos que apresentam o contato lítico nessa faixa de profundidade, os quais são denominados de “lépticos”. O critério 17 tem a mesma base do critério 16, diferindo na atividade da fração argila, a qual deve ser alta e no teor de argila que deve ser maior ou igual a 20 % para solos de textura média.

O critério 18 inclui solos que apresentam camada restritiva forte dentro de 50 cm de profundidade. Este é o caso, por exemplo, de solos que apresentam contato lítico nessa faixa de profundidade, sendo, portanto, denominados de “líticos”.

O critério 19 compreende solos que apresentam lençol d’água subterrâneo dentro de 100 cm de profundidade por algum período do ano ou permanentemente. Este critério pode incluir solos classificados como Espodossolos (...) Hidromórficos, Espodossolos (...) Hidro-hiperespessos, Gleissolos, Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos e gleissólicos. Também inclui solos que se encontram em ambiente mal drenado ou em ambientes úmidos de altitudes elevadas e saturados por água durante alguns dias da estação úmida, como é o caso de solos da ordem dos Organossolos.

#### **4.2. Aplicação das classificações hidrológicas proposta e do NRCS (2007)**

Para aplicar as classificações hidrológicas proposta e do NRCS (NRCS, 2007) foram usadas algumas informações de 58 perfis de solos do Brasil, com dados de condutividade hidráulica, que estão citados e referenciados na Tabela 3.12. Para estes perfis, no Apêndice A, são apresentados para cada horizonte ou camada a simbologia do horizonte, profundidade inicial e final do horizonte, a classe textural do USDA (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993) e da Embrapa (1979), e a condutividade hidráulica saturada (Ks). Os resultados da classificação hidrológica dos 58 perfis de solos são apresentados na seqüência de acordo com o agrupamento dos perfis ao nível de ordem do atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

#### **Argissolos**

Segundo Embrapa (2006) esta ordem compreende os solos classificados anteriormente como Rubrozem, Podzólico Bruno-Acinzentado, Podzólico Vermelho-Amarelo Ta, alguns Podzólicos Vermelho-Amarelos Tb com T mínima de 20 cmol<sub>c</sub>/kg de argila, Podzólico

Vermelho-Amarelo Tb, pequena parte de Terra Roxa Estruturada Similar, de Terra Bruna Estruturada e de Terra Bruna Estruturada Similar, com gradiente textural necessário para B textural, e Podzólico Vermelho-Escuro Tb com B textural e o Podzólico Amarelo. Portanto, os perfis 1, 2, 3, 4, 13, 14, 34, 35, 40, 41, 42 e 58 pertencem a esta ordem.

A Tabela 4.2 apresenta a classificação hidrológica dos perfis de Argissolos usando os critérios propostos neste trabalho e os critérios propostos pelo NRCS (2007). Na primeira coluna encontra-se o número do perfil, na segunda coluna os critérios e classificação hidrológica do perfil segundo a classificação proposta, e na terceira coluna são apresentados os critérios e classificação hidrológica do perfil segundo a classificação do NRCS (2007).

Classificados como Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto A moderado textura arenosa/média, os perfis 1, 2 e 13 apresentam como características principais horizonte superficial de textura arenosa associados à mudança textural abrupta dentro de 50 cm de profundidade, a qual é uma restrição moderada ao movimento vertical da água no solo.

Os perfis 3, 4 e 14 classificados como Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto textura arenosa/média apresentam mudança textural abrupta entre 50 e 100 cm de profundidade, portanto, um impedimento moderado a uma profundidade maior que no caso dos perfis 1, 2 e 13. Assim, haverá menor impacto sobre o processo de geração do escoamento superficial.

O Perfil 34 é de um Argissolo Amarelo Coeso. Sua maior limitação é o caráter coeso apresentado pelos horizontes BA, Bt1 e Bt2, sendo o Bt1 com a menor condutividade hidráulica saturada. O perfil 35, classificado como Argissolo Acinzentado, tem como característica principal à mudança textural abrupta abaixo de 100 cm de profundidade, sendo caracterizado com o termo “espesoarênico” de acordo com o atual Sistema de Brasileiro de Classificação de Solos.

Os perfis 40, 41 e 42 possuem como principal impedimento o fragipã a 75 cm de profundidade. Esta é uma camada restritiva forte e considerada impermeável para os propósitos de classificação hidrológica. Igualmente, o perfil 58, classificado como Argissolo Amarelo

Distrófico fragipânico latossólico, tem o mesmo tipo de impedimento, ou seja, o fragipã entre 50 e 100 de profundidade. Contudo, pode haver outro fator que proporcionou a baixa condutividade hidráulica saturada da camada superficial, tal como a compactação superficial do solo, visto que esse horizonte (Ap) apresentou o menor valor para a Ks do perfil. Além disso, os perfis 40, 41 e 42 são de textura média e o perfil 58 é de textura argilosa.

Tabela 4.2. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Argissolos.

Perfil	Classificação Hidrológica Proposta		Classificação Hidrológica do NRCS	
	Critério	GHS	Critério	GHS
1	7 - mudança textural abrupta dentro de 50 cm	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 12 mm/h (Bt2 a 57-87 cm)	C
2	7 - mudança textural abrupta dentro de 50 cm	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 12 mm/h (Bt2 a 55-86 cm)	C
3	4 - mudança textural abrupta entre 50 e 100 cm	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 22 mm/h (Bt2 a 80-108 cm)	B
4	4 - mudança textural abrupta entre 50 e 100 cm	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 24 mm/h (Bt2 a 72-99 cm)	B
13	7 - mudança textural abrupta dentro de 50 cm	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 20 mm/h (Bt2 a 50-93 cm)	B
14	4 - mudança textural abrupta entre 50 e 100 cm	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 32 mm/h (Bt2 a 66-102 cm)	B
34	4 - horizonte coeso dentro de 50 cm de profundidade	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 2,3 mm/h (Bt1 a 67-103 cm)	C
35	2 - mudança textural abrupta abaixo de 100 cm	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 47,8 mm/h (E2 a 87-105 cm)	A
40	16 - camada impermeável entre 50 e 100 cm	C	camada impermeável entre 50-100 cm; Ks = 219 mm/h (Bt a 34-75 cm)	A
41	16 - camada impermeável entre 50 e 100 cm	C	camada impermeável entre 50-100 cm; Ks = 116 mm/h (Bt a 35-73 cm)	B
42	16 - camada impermeável entre 50 e 100 cm	C	camada impermeável entre 50-100 cm; Ks = 60 mm/h (Bt1 a 30-59 cm)	B
58	16 - camada impermeável entre 50 e 100 cm	C	camada impermeável entre 50-100 cm; Ks = 5,4 mm/h (Ap a 0-10 cm)	C

Como apresentado na Tabela 4.2, dos doze perfis de solos analisados, a correspondência entre as duas classificações hidrológicas foi idêntica para oito deles. Apenas um solo (perfil 40) apresentou um desvio de dois grupos hidrológicos, sendo classificado no GHS C (classificação proposta) e no GHS A (classificação do NRCS). Neste perfil o fragipã inicia-se a 76 cm, mas o horizonte menos permeável (Bt a 34-75 cm) apresenta elevada Ks, a qual permitiu classificá-lo no GHS A de acordo com os critérios do NRCS (2007). Contudo, todas as medições de Ks apresentadas foram feitas em amostras indeformadas e em laboratório. Este ensaio não considera

a influência da camada restritiva forte que se apresenta abaixo do horizonte Bt. Situações similares ocorreram com os perfis 41 e 42, sendo que os valores de Ks dos horizontes menos permeáveis permitiram classificá-los no GHS B de acordo com os critérios do NRCS (2007). Esses comentários também são válidos para o perfil 13 que foi classificado no GHS C, segundo a classificação proposta, por apresentar camada restritiva moderada acima de 50 cm de profundidade.

De acordo com os resultados obtidos, a classificação proposta pode ser considerada adequada para a ordem dos Argissolos e quando se desvia da classificação do NRCS (NRCS, 2007) apresenta desvios a favor da segurança. Além disso, a classificação proposta traz maior padronização que dados de condutividade hidráulica saturada medida em profundidades variadas e por métodos distintos, pois há elevada variabilidade nas medições de condutividade hidráulica do solo.

## Cambissolos

Segundo Embrapa (2006) esta ordem compreende os solos classificados anteriormente como Cambissolos Eutróficos, distróficos e Álicos Ta e Tb, exceto os com horizonte A chernozêmico e B incipiente Eutróficos Ta. Os perfis 32 e 57 pertencem a esta ordem. A Tabela 4.3 apresenta a classificação hidrológica dos perfis de Cambissolos usando os critérios propostos neste trabalho e os critérios propostos pelo NRCS (2007).

Tabela 4.3. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Cambissolos.

Perfil	Classificação Hidrológica Proposta		Classificação Hidrológica do NRCS	
	Critério	GHS	Critério	GHS
32	11 - textura argilosa e Tb	B	camada impermeável abaixo de 100 cm; Ks = 2 mm/h (Bi a 28-36 cm)	C
57	11 - textura argilosa e Tb	B	camada impermeável abaixo de 100 cm; Ks = 332 mm/h (Bi1 a 22-70 cm)	A

O perfil 32 apresenta baixa condutividade hidráulica e textura argilosa no horizonte Bi1. O perfil 57 também é de textura argilosa, porém apresenta condutividade hidráulica saturada bastante elevada. Como pode ser observado na Tabela 4.3, a classificação hidrológica proposta colocou o perfil 32 em um grupo hidrológico de menor potencial de escoamento superficial do que a classificação hidrológica do NRCS, e o perfil 57 em um grupo hidrológico de menor potencial de escoamento superficial.

O perfil 32 foi classificado no GHS B de acordo com o critério 11 da classificação proposta por não apresentar camada restritiva forte dentro de 100 cm de profundidade, mas foi classificado no GHS C segundo os critérios do NRCS (2007) por apresentar Ks de 2 mm/h no horizonte B incipiente (Bi). Igualmente, o perfil 57 foi classificado no GHS B de acordo com o critério 11 da classificação proposta e no GHS A segundo os critérios do NRCS (2007). Esta diferença entre as condutividades hidráulicas dos dois perfis pode estar associada à textura do solo. O perfil 32 originado de filito apresenta textura muito argilosa e estrutura mais compacta do que a do perfil 57 originado de aluvião com textura argila siltosa.

A ordem dos Cambissolos apresenta uma grande variabilidade de atributos o que dificulta uma generalização mais precisa. Em geral, desvios como apresentados para os perfis 32 e 57 estão sujeitos a ocorrerem. Portanto, para outros casos similares aos dos perfis 32 e 57 os critérios 11 e 14 devem ser usados com cautela para a ordem dos Cambissolos.

## Chernossolos

Segundo Embrapa (2006) os Chernossolos são solos constituídos por material mineral que tem como características alta saturação por bases, argila de alta atividade e horizonte A chernozêmico sobre um horizonte B textural, B nítico, B incipiente ou horizonte C cálcico ou carbonático. A ordem dos Chernossolos compreende os solos anteriormente classificados como Brunizem, Rendzina, Brunizem Avermelhado e Brunizem hidromórfico. Os perfis 5, 6 e 15 pertencem a esta ordem. Na Tabela 4.4 é apresentada a classificação hidrológica destes perfis usando os critérios propostos neste trabalho e os critérios propostos pelo NRCS (2007).

Tabela 4.4. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Chernossolos.

Perfil	Classificação Hidrológica Proposta		Classificação Hidrológica do NRCS	
	Critério	GHS	Critério	GHS
5	16 - camada restritiva forte entre 50 e 100 cm, textura média (< 20% argila) e Ta	C	camada impermeável entre 50-100 cm; Ks = 69 mm/h (Bi a 47-80 cm)	B
6	16 - camada restritiva forte entre 50 e 100 cm, textura média (< 20% argila) e Ta	C	camada impermeável entre 50-100 cm; Ks = 93 mm/h (Bi a 47-71 cm)	B
15	16 - camada restritiva forte entre 50 e 100 cm, textura média (< 20% argila) e Ta	C	camada impermeável entre 50-100 cm; Ks = 80 mm/h (Bi a 35-62 cm)	B

As características principais dos perfis 5, 6 e 15 são a textura média dos horizontes superficial e subsuperficial, o contato lítico entre 50 e 100 cm de profundidade, que é um impedimento forte à percolação de água e a atividade alta da fração argila. Contudo, o teor de argila é em torno de 12 %. Segundo Oliveira (2005) a estrutura em blocos ou prismática fortemente desenvolvida está, em geral, relacionada a solos de textura média com teor de argila superior a 30% ou ligeiramente inferior quando essa fração apresenta alta atividade. Assim, embora a fração argila dos perfis 5, 6 e 15 apresente elevada atividade, as propriedades da fração areia são dominantes por representar cerca de 70% da fração terra fina seca ao ar. Isto justifica em parte a boa condutividade hidráulica saturada do horizonte Bi, a qual segundo os critérios do NRCS (2007) permitiu classificá-los no GHS B. Já a classificação hidrológica proposta colocou os solos analisados no GHS C por apresentarem camada restritiva forte entre 50 e 100 cm, textura média (< 20 % de argila) e fração argila de alta atividade.

## Gleissolos

Segundo Embrapa (2006) esta ordem compreende os solos classificados anteriormente como Glei Pouco Húmico, Glei Húmico, parte do Hidromórfico Cinzento (sem mudança textural abrupta), glei Tiomórfico e solonchak com horizonte glei. Assim, os perfis 7, 8 e 16 se enquadram nesta ordem, os quais possuem como característica principal o lençol d'água subterrâneo próximo à superfície (ZIMBACK, 1993). Segundo Embrapa (2006) solos desta classe encontram-se permanentemente ou periodicamente saturados por água, salvo se



artificialmente drenados. A Tabela 4.5 apresenta a classificação hidrológica destes solos usando os critérios propostos e os critérios do NRCS (2007).

Tabela 4.5. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Gleissolos.

Perfil	Classificação Hidrológica Proposta		Classificação Hidrológica do NRCS	
	Critério	GHS	Critério	GHS
7	19 - solos que permanecem saturados por água dentro de 100 cm de profundidade por algum período do ano	D	horizonte glei inicia-se a cerca de 25 cm da superfície. Isso indica a presença de lençol subterrâneo elevado, < 60 cm.	D
8	idem perfil 7	D	idem perfil 7	D
16	idem perfil 7	D	idem perfil 7	D

Os três perfis representativos da ordem dos Gleissolos foram classificados no GHS D segundo os critérios da classificação hidrológica proposta e da classificação hidrológica do NRCS. Isso ocorreu porque o critério 19 (classificação proposta) é similar ao critério do NRCS (2007) que coloca todos os solos que apresentam lençol subterrâneo acima de 60 cm de profundidade no GHS D, independentemente da condutividade hidráulica apresentada pelos horizontes não saturados.

## Latossolos

Segundo Embrapa (2006) esta ordem compreende os solos classificados anteriormente como Latossolos, excetuadas algumas modalidades anteriormente identificadas como Latossolos Plínticos. Assim, dos 58 perfis selecionados, 28 pertencem à ordem dos Latossolos. Tal fato não é por acaso, esta ordem é a de maior cobertura do território brasileiro. Em geral, os solos da ordem dos Latossolos apresentam avançado estágio de intemperismo, sendo compostos principalmente por material coloidal de baixa capacidade de troca de cátions (minerais de argila do grupo 1:1 e/ou óxidos de ferro e alumínio) e baixos teores de minerais facilmente alteráveis (OLIVEIRA, 2005). A Tabela 4.6 apresenta a classificação hidrológica dos perfis de Latossolos usando os critérios propostos neste trabalho e os critérios propostos pelo NRCS (2007).

Tabela 4.6. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Latossolos.

Perfil	Classificação Hidrológica Proposta		Classificação Hidrológica do NRCS	
	Critério	GHS	Critério	GHS
19	3 - textura média, argilosa ou muito argilosa, CTC < 17 cmolc/kg de argila, elevado teor de óxido de ferro e/ou propriedades ácricas	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 807 mm/h (Bw2 a 77-165 cm)	A
20	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 297 mm/h (Ap a 5-20 cm)	A
21	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 133 mm/h (Ap a 5-24 cm)	A
22	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 829 mm/h (A/B a 20-40 cm)	A
23	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 143 mm/h (Ap a 0-18 cm)	A
24	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 80 mm/h (Ap a 0-10 cm)	A
25	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 644 mm/h (Bw2 a 100-200 cm)	A
26	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 215 mm/h (Ap a 0-25 cm)	A
27	idem 19	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 241 mm/h (Ap a 0-15 cm)	A
28	8 - horizonte coeso dentro de 50 cm de profundidade	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 63 mm/h (BA a 35-80 cm)	A
29	idem 28	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 40 mm/h (BA a 35-70 cm)	A
30	idem 28	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 54 mm/h (BA a 40-80 cm)	A
31	idem 28	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 26 mm/h (BA a 35-70 cm)	B
33	idem 28	C	camada impermeável > 100 cm; Ks = 8,6 mm/h (Bw1 a 80-150 cm)	C
36	12 - textura média, argilosa ou muito argilosa, CTC < 17 cmolc/kg de argila, baixo teor de óxido de ferro e sem propriedades ácricas	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 118 mm/h (BA a 8-43 cm)	A
37	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 175 mm/h (BA a 10-45 cm)	A
38	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 170 mm/h (BA a 16-43 cm)	A
39	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 243 mm/h (Bw1 a 46-87 cm)	A
44	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 160 mm/h (Ap a 0-10 cm)	A
45	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 202 mm/h (A3 a 18-30 cm)	A
47	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 331 mm/h (B1 a 30-60 cm)	A

(continua)

Tabela 4.6. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Latossolos (continuação).

Perfil	Classificação Hidrológica Proposta		Classificação Hidrológica do NRCS	
	Critério	GHS	Critério	GHS
48	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 237,8 mm/h (Bw2 a 75-100 cm)	A
50	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 186 mm/h (Bw1 a 46-65 cm)	A
51	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 295 mm/h (Bw1 a 48-110 cm)	A
52	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 302 mm/h (Bw1 a 62-120 cm)	A
53	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 234 mm/h (Bw1 a 102-152 cm)	A
54	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 209 mm/h (Bw1 a 105-177 cm)	A
55	idem 36	B	camada impermeável > 100 cm; Ks = 123 mm/h (Bw2 a 58-96 cm)	A

De grande destaque aqui é que apenas os perfis 46, 47 e 50 são de textura média, ou seja, apresentam teor de argila menor que 35% e teor de areia total entre 15 e 85 %, enquanto que os demais perfis são solos de textura argilosa (> 35% de argila) ou muito argilosa (> 60 % de argila). De acordo com as características gerais da classificação hidrológica do NRCS (2007) solos de textura argilosa ou muito argilosa seriam classificados nos grupos hidrológicos D ou talvez C, mas usando os critérios baseados na condutividade hidráulica saturada do horizonte menos permeável, apenas os perfis 31 e 33 não foram classificados no grupo hidrológico A.

A correspondência entre as duas classificações foi perfeita para os Latossolos Acriférricos (19 a 21) e Férricos (perfis 22 a 27), ambos argilosos e classificados no grupo hidrológico A. Estes solos contêm elevado teor de óxido de ferro, que é um agente auxiliador na produção de agregados estáveis, os quais são chamados às vezes de “pseudo-areias”. Isto lhes confere boa porosidade e boa condutividade hidráulica saturada. Razoável correlação linear entre óxidos de ferro total e a macroporosidade de alguns Latossolos do Estado do Paraná foi mostrada por Ghidin (2006). Evidentemente, este não é o único fator, mas ele atua como auxiliador aos demais fatores que promovem a agregação do solo. Por esse motivo, os Latossolos com baixo a médio teor de óxidos de ferro (perfis 36 a 39, 44 a 48, 50 a 55) foram enquadrados no grupo hidrológico B pela classificação proposta.

Considerando apenas os dados de condutividade hidráulica saturada do horizonte B, os solos com elevado teor de óxidos de ferro (perfis 19 a 27) foram comparados com os solos de baixo a médio teor de óxidos de ferro (perfis 44 a 48 e 50 a 55) usando o teste t de comparação de médias para dados não emparelhados e variâncias diferentes.

Os Latossolos com elevado teor de ferro apresentaram condutividade hidráulica saturada (Ks) média de 661,3 mm/h, enquanto que os Latossolos com baixo a médio teor de óxido de ferro apresentaram Ks média de 373,4 mm/h, um valor que é 56,4 % da Ks média dos Latossolos Férricos. De fato, os resultados do teste t apresentados na Tabela 4.7 mostram que as condutividades hidráulicas saturadas em média são significativamente diferentes ao nível de 1 %. Portanto, parece coerente manter os critérios de classificação como estão, mesmo que os valores de Ks permitam colocá-los num mesmo grupo hidrológico de acordo com os critérios do NRCS (2007).

Tabela 4.7. Comparação da condutividade hidráulica saturada entre Latossolos com alto e baixo teor de óxidos de ferro.

<b>Descrição</b>	<b>Grupo de alto teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Grupo de baixo a médio teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
Média	661,3	373,4
Variância	44595,06	85609,08
Número de observações	18	28
Ho: Diferença entre médias		0
Graus de liberdade		43
t		3,87
P(T<=t) unilateral		< 1%
t crítico unilateral		1,68
P(T<=t) bilateral		< 1%
t crítico bilateral		2,02

## Neossolos

Os Neossolos são solos constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso, com pequena atuação dos processos pedogenéticos devido a: (1) baixa intensidade desses

processos, que não permitiu ainda modificações expressivas do material de origem; (2) características do próprio material, pela sua resistência ao intemperismo ou composição química; (3) relevo, que, isoladamente ou em conjunto, impediu ou limitou a evolução desses solos (EMBRAPA, 2006).

A ordem dos Neossolos agrega quatro subordens: Neossolos Litólicos (perfis 11, 12 e 18), Neossolos Flúvicos (perfis 9, 10 e 17), Neossolos Regolíticos (sem exemplar) e Neossolos Quartzarênicos (perfil 56), os quais foram anteriormente denominados de Solos Litólicos, Solos Aluviais, Regossolos e Areias Quartzosas, respectivamente. Os resultados da aplicação das classificações hidrológicas proposta e do NRCS (2007) estão apresentados na Tabela 4.8.

Os Neossolos Litólicos têm como característica principal o contato lítico a pouca profundidade, a menos de 50 cm. O contato com a rocha é um fator limitante muito forte no que diz respeito à percolação de água e no desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Os Neossolos Flúvicos são solos formados por sedimentos aluviais e situados às margens dos rios ou em planícies de inundação. Os Neossolos Quartzarênicos são solos arenosos com pouca ou nenhuma variação textural ao longo do perfil. A textura areia ou areia franca concede a estes solos elevada condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil. A grande limitação destes solos é quando o lençol subterrâneo encontra-se elevado.

Tabela 4.8. Classificação hidrológica dos perfis da ordem dos Neossolos.

Perfil	Classificação Hidrológica Proposta		Classificação Hidrológica do NRCS	
	Critério	GHS	Critério	GHS
9	2 - textura arenosa ou média até a camada restritiva	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 132 mm/h (2C2 a 45-120 cm)	A
10	idem perfil 9	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 140 mm/h (2C2 a 56-112 cm)	A
11	18 - contato lítico dentro de 50 cm de profundidade	D	camada impermeável < 50 cm	D
12	idem perfil 11	D	idem perfil 11	D
17	idem perfil 9	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 142 mm/h (Ap a 0-18 cm)	A
18	idem perfil 11	D	idem perfil 11	D
56	1 - solo de textura arenosa em todo o perfil	A	camada impermeável > 100 cm; Ks = 185,4 mm/h (Ap a 0-16 cm)	A

Pode ser observada na Tabela 4.8 uma perfeita correspondência entre as classificações hidrológicas proposta e do NRCS para os sete perfis de solos analisados. Os perfis 9, 10, 17 e 56 apresentam textura arenosa em todos os horizontes e não apresentam camada restritiva dentro de 100 cm de profundidade, satisfazendo os critérios 1 e 2 da classificação proposta. A correspondência exata com a classificação do NRCS foi obtida com base na Ks apresentada pela camada menos permeável do perfil. Considerando que a textura arenosa em todos os horizontes está de acordo com as características gerais apresentadas pela classificação hidrológica do NRCS (ver item 2.2), essa perfeita correspondência não é surpreendente.

Da mesma forma, para os perfis 11, 12 e 18, a classificação do NRCS coloca no GHS D todos os solos que apresentam camada impermeável (camada restritiva forte) dentro de 50 cm de profundidade, independentemente da Ks apresentada pelos horizontes acima de tal impedimento. Este critério é idêntico ao critério 18 da classificação hidrológica proposta.

## Nitossolos

Segundo Embrapa (2006) esta ordem compreende os solos classificados anteriormente como Terra Roxa Estruturada, Terra Roxa Estruturada Similar, Terra Bruna Estruturada, Terra Bruna Estruturada Similar e alguns Podzólicos Vermelho-Escuros Tb e alguns Podzólicos Vermelho-Amarelos Tb.

Na base de dados, apenas o perfil 43 pertence à ordem dos Nitossolos. As principais características desse perfil são: textura muito argilosa, CTC baixa e razão textural menor do que 1,5. Além disso, não apresenta qualquer camada restritiva dentro de 100 cm de profundidade. Portanto, de acordo com a classificação hidrológica proposta ele é classificado no grupo hidrológico B (critério 10). Com base nos critérios do NRCS (2007) este perfil é classificado no grupo hidrológico B, com Ks da camada menos permeável dentro de 100 cm de profundidade igual a 23,8 mm/h.

## Planossolos

Segundo Embrapa (2006) esta ordem compreende os solos classificados anteriormente como Planossolos, Solonetz-Solodizado e Hidromórficos Cinzentos que apresentam mudança textural abrupta. Os Planossolos são solos minerais imperfeitamente ou mal drenados e apresentam mudança textural abrupta, com horizonte B adensado e de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta.

O perfil 49 é o único da ordem dos Planossolos. O horizonte Bt com condutividade hidráulica saturada de 0,15 mm/h confirma sua característica de permeabilidade lenta e, portanto, foi classificado no grupo hidrológico D, de acordo com os critérios do NRCS (2007). Este perfil também foi classificado no grupo hidrológico D pela classificação proposta, de acordo com o critério 17.

### **4.2.1. Comentários gerais sobre a correspondência entre a classificação hidrológica proposta e a do NRCS (2007)**

Para verificar a compatibilidade entre as duas classificações hidrológicas foi realizada uma análise comparativa usando 58 perfis de solos. Os resultados de aplicação das classificações hidrológicas proposta e do NRCS (2007) a estes 58 perfis de solos mostrou que 28 perfis foram classificados no mesmo grupo hidrológico de solo e 26 perfis foram classificados em grupos hidrológicos adjacentes, isto é, A/B ou B/C ou C/D, sendo que em apenas um caso (perfil 32) a classificação proposta enquadrou o perfil em um grupo de menor potencial de escoamento superficial, comparado com a classificação hidrológica deste mesmo perfil de acordo com os critérios do NRCS (2007). O maior distanciamento entre a classificação dos grupos hidrológicos ocorreu apenas para quatro perfis de solos: 28, 29, 30 e 40. Estes perfis foram enquadrados no grupo hidrológico C segundo a classificação proposta e no grupo hidrológico A segundo a classificação do NRCS (2007).

No caso do perfil 40, existe abaixo do horizonte Bt fragipã, mas o horizonte menos permeável (Bt) apresenta elevada Ks, a qual permitiu classificá-lo no GHS A de acordo com os critérios do NRCS (2007). Contudo, todas as medições de Ks apresentadas foram feitas em amostras indeformadas e em laboratório, as quais não consideram a influência de tal camada. Os perfis 28, 29 e 30 foram classificados no GHS C, segundo o critério 4 da classificação hidrológica proposta, por apresentarem horizonte coeso dentro de 50 cm de profundidade. Os mesmos solos foram classificados no GHS A segundo os critérios do NRCS (2007) baseados na condutividade hidráulica saturada do horizonte menos permeável, no caso o horizonte coeso. No entanto, os valores da Ks para estas camadas menos permeáveis são muito inferiores (< 50%) do que os valores de Ks observados para os demais perfis de Latossolos. Isso mostra que o horizonte coeso é um impedimento moderado e significativo. Além disso, o perfil 33 também apresenta horizonte coeso dentro de 50 cm de profundidade, mas o valor da Ks apresentado pelo horizonte menos permeável (o coeso) foi baixo o suficiente para que fosse também classificado no grupo hidrológico C, segundo os critérios do NRCS (2007).

Em geral, os resultados mostraram que a classificação hidrológica proposta é mais conservadora, ou seja, quando se desvia da classificação hidrológica do NRCS (2007) tende para grupos hidrológicos de solos de maior potencial de escoamento superficial. Aparentemente isso é válido para solos de todas as ordens analisadas neste trabalho com exceção dos Cambissolos que não possuem camada restritiva dentro de 100 cm de profundidade, por apresentarem uma grande variabilidade de atributos, o que dificulta uma generalização mais precisa para os critérios de classificação hidrológica. Isso foi observado na análise dos perfis 32 e 57, os quais se encaixaram no critério 16, sendo então classificados no GHS B. No entanto, a diferença entre a Ks do perfil 32 e 57 é significativa e, segundo os critérios do NRCS (2007), estes foram classificados nos GHS C e A, respectivamente. Nesse caso, essa diferença é possivelmente devida à textura muito argilosa do perfil 32 e a textura argilo siltosa do perfil 57, conforme discutido anteriormente.

Com base nos resultados obtidos pode-se dizer que os critérios propostos foram mais eficientes para a ordem dos Chernossolos, Gleissolos, Latossolos, Neossolos, Nitossolos e Planossolos do que foram para a ordem dos Argissolos e Cambissolos. Isso pode estar associado à grande variabilidade de combinações de atributos de solos que interferem na drenagem do perfil



de solos pertencentes à ordem dos Argissolos e dos Cambissolos. Contudo, a classificação hidrológica proposta traz maior padronização para os critérios de classificação do que dados de condutividade hidráulica saturada, medidos ao longo do perfil de solo, devido à elevada variabilidade de suas medições e também devido ao uso de diferentes métodos de medição. Assim, a classificação hidrológica proposta pode ser considerada adequada à realidade do Brasil.

### **4.3. Análise dos métodos de calibração do parâmetro CN**

O objetivo desta análise foi escolher métodos de calibração a serem adotados na determinação do CN. Portanto, trata-se de um estudo anterior ao estudo de calibração do CN. Para isso foram selecionadas cinco bacias com as melhores representações de cada comportamento CN-P (Padrão, Complacente e Violento, conforme apresentado no item 2.3.5 da revisão bibliográfica) totalizando 15 bacias. Aos eventos de chuva e escoamento superficial direto observados nessas bacias foram aplicados seis métodos de calibração: (1) “National Engineering Handbook - NEH”; (2) Mínimos Quadrados - LS; (3) Curva de Frequência - FM; (4) P/S; (5) Assintótico - AS; (6) Frequência Log-Normal - LN. Estes métodos estão apresentados no item 2.3 da revisão bibliográfica e no item 3.5 do material e métodos. A comparação dos métodos foi realizada considerando dois modos de aplicação do método do CN (frequência igualada e simulação de eventos) e dois tratamentos de dados (naturais e ordenados).

#### **4.3.1. Escolha das bacias e características dos eventos**

Para escolher as 15 bacias com as 5 melhores representações de cada comportamento do CN com relação à chuva total (Padrão, Complacente e Violento), as séries de chuva e escoamento superficial direto resultante foram classificadas separadamente em ordem decrescente e reagrupadas para formar a série de eventos ordenados. Nesta série, a chuva e o escoamento possuem a mesma ordem de magnitude e isto não significa que o escoamento superficial direto é necessariamente resultante da chuva de mesma ordem. Com a série ordenada o CN é calculado

para cada par de eventos chuva-escoamento e plotado contra a chuva total (abscissa) para a visualização do comportamento CN-P apresentado pela bacia. Um exemplo deste gráfico é apresentado na Figura 4.1, onde CNo é o valor do CN para  $Q = 0$ . Este é o limiar do escoamento quando  $P = I_a$  (ou  $0,2.S$ ). Assim, todos os pontos de  $Q > 0$  estão acima da linha representada por CNo.

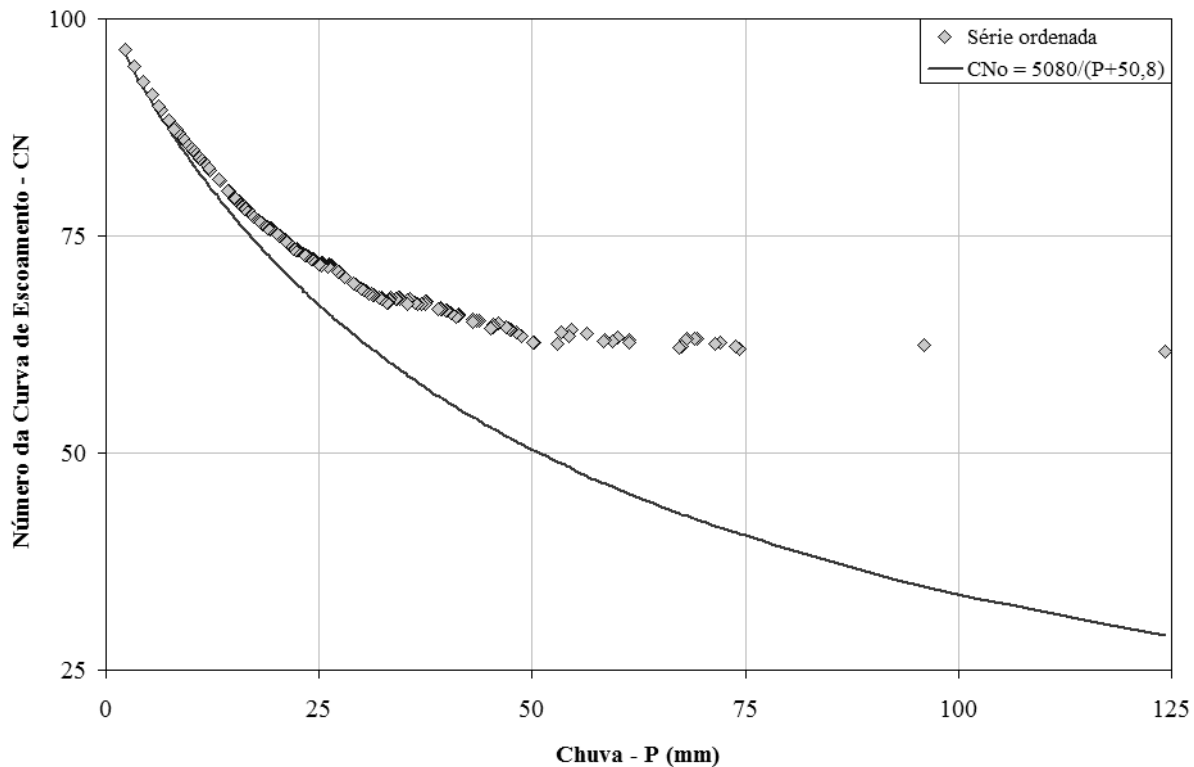


Figura 4.1. Dados ordenados da bacia CC4129 mostrando comportamento Padrão.

As estatísticas dos eventos observados nas bacias selecionadas são apresentadas na Tabela 4.9, na qual se verifica que os maiores escoamentos superficiais diretos foram em média menores para as bacias Complacentes e maiores para as bacias Violentas. Isto significa que são bacias de baixa e alta resposta hidrológica, respectivamente. Isso pode ser verificado também na pela relação entre o volume total escoado e o volume total precipitado, representado na Tabela 4.9 pela relação entre as médias do escoamento superficial direto e da chuva total.

Tabela 4.9. Resumo estatístico dos eventos observados nas bacias selecionadas.

Variável	Sumário	Bacias de comportamento Complacente					Bacias de comportamento Padrão					Bacias de comportamento Violento				
		CC298D	EC03	WBOF	WCAP	WPAR	CC201	CC248B	CC4129	CM247	SUM01	LCM	LPC	LSC2	SUP02	SUP07
P (mm)	mínimo	2,70	6,10	4,70	2,40	2,90	2,20	1,50	2,20	3,20	5,30	8,80	8,80	8,80	2,80	1,20
	1.º Q	8,80	17,00	17,10	11,60	9,88	7,40	9,20	16,40	12,10	20,40	16,80	17,10	16,80	14,20	9,80
	mediana	14,20	24,00	25,64	17,90	15,65	13,60	17,40	24,40	21,80	30,40	26,40	26,70	26,40	24,60	18,80
	média	19,96	31,31	29,56	21,75	17,40	19,00	23,75	28,62	26,05	38,28	35,82	36,08	35,82	29,50	23,03
	3.º Q	25,95	45,73	37,06	28,10	19,85	26,90	34,77	37,40	34,50	45,20	41,90	41,92	41,90	33,80	30,20
	máximo	76,10	71,00	89,20	118,70	58,80	130,80	102,20	124,30	98,60	163,60	132,40	132,40	132,40	161,20	161,20
desv.padrão	15,98	19,30	19,86	15,91	12,01	15,54	19,32	17,75	17,81	27,74	27,05	27,07	27,05	23,92	20,07	
Q (mm)	mínimo	0,01	0,04	0,08	0,10	0,30	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,06	0,06	0,01	0,01
	1.º Q	0,03	0,28	0,13	0,30	0,43	0,15	0,04	0,06	0,18	0,02	0,19	0,25	0,61	0,02	0,08
	mediana	0,07	0,30	0,21	0,70	1,15	1,16	0,13	0,24	1,12	0,04	0,44	0,48	5,68	0,06	0,25
	média	0,19	0,77	0,30	1,45	1,39	5,54	1,79	1,24	4,29	1,55	6,14	7,61	15,03	4,16	6,55
	3.º Q	0,15	1,15	0,36	1,70	2,10	7,76	1,17	1,17	4,45	0,14	6,95	7,36	20,63	1,29	7,64
	máximo	2,59	3,40	1,40	10,20	4,30	88,07	34,68	34,24	48,50	41,11	68,63	65,05	74,86	80,20	92,00
desv.padrão	0,42	0,79	0,31	1,89	1,11	9,54	4,24	3,14	7,09	6,08	11,93	14,28	20,04	12,41	12,84	
CN <sup>1</sup>	mínimo	43,61	48,79	43,18	44,47	59,78	61,41	43,61	37,90	49,27	40,68	47,82	50,60	66,83	37,92	56,83
	1.º Q	70,07	60,24	64,06	76,31	80,17	85,56	70,28	65,43	73,53	55,83	70,23	71,32	81,05	66,98	79,31
	mediana	80,78	74,88	70,32	82,39	85,29	90,99	80,96	74,20	83,83	64,69	77,32	77,80	85,68	77,23	87,61
	média	77,84	71,53	70,68	81,37	85,32	88,84	79,00	73,33	81,38	65,14	75,77	77,16	85,54	75,37	85,34
	3.º Q	87,95	79,74	77,97	87,79	92,86	94,03	89,59	82,58	90,50	73,87	83,04	83,39	91,16	84,09	92,36
	máximo	95,99	94,62	93,57	98,30	98,83	99,61	98,99	96,92	99,59	91,36	96,67	94,89	98,56	98,28	99,12
desv.padrão	13,27	13,66	13,03	9,15	8,93	7,28	12,60	11,49	11,38	11,55	9,82	8,95	7,58	12,75	8,81	
CN <sup>2</sup>	mínimo	50,67	54,34	43,18	46,41	62,24	84,61	67,78	61,63	76,26	51,04	65,90	68,96	78,20	65,05	75,42
	1.º Q	69,82	61,63	63,28	76,66	84,73	87,80	70,05	67,32	79,27	56,04	72,15	74,50	83,53	69,23	82,25
	mediana	80,76	73,28	70,79	81,96	86,33	89,06	78,05	72,79	80,60	64,46	75,23	77,29	85,99	73,40	86,19
	média	77,79	71,59	70,68	81,55	85,74	89,43	79,08	73,26	82,06	64,95	75,87	77,34	86,07	75,40	85,84
	3.º Q	86,68	80,01	78,36	86,52	89,54	90,51	86,51	78,23	84,66	72,77	79,42	80,12	88,97	80,29	88,56
	máximo	95,57	90,92	93,57	97,16	97,45	96,42	97,61	96,42	94,74	91,36	87,06	87,45	90,94	95,41	98,12
desv.padrão	12,02	11,22	12,54	7,56	7,23	2,57	8,82	7,94	3,88	10,14	4,90	4,34	2,92	7,92	4,36	
$\bar{Q} / \bar{P}$		0,01	0,02	0,01	0,07	0,08	0,29	0,08	0,04	0,16	0,04	0,17	0,21	0,42	0,14	0,28

<sup>1</sup> Série de dados naturais; <sup>2</sup> Série de dados ordenados;  $\bar{Q}$ : média dos valores de Q;  $\bar{P}$ : média dos valores de P.

### 4.3.2. Parâmetro CN e resposta da bacia

Os seis métodos de calibração do CN foram aplicados usando todos os eventos disponíveis com escoamento superficial maior do que zero. Com exceção do método LN que trata a série de chuva e de escoamento superficial direto separadamente, os demais métodos de calibração foram aplicados usando as séries de dados naturais e ordenados. Os resultados da calibração para as 15 bacias selecionadas para esta análise são apresentados na Tabela 4.10.

Como pode ser observado na Tabela 4.10, os maiores valores calibrados para o parâmetro CN pertencem às bacias com comportamento Violento, como era esperado, uma vez que são bacias de alta resposta hidrológica, conforme mostra a estatística descritiva dos eventos de escoamento superficial direto apresentada na Tabela 4.9. Para as bacias com comportamento Complacente os métodos AS e LS determinaram os menores valores para o parâmetro CN, como

era esperado, uma vez que são bacias de baixa resposta hidrológica. No entanto, para as bacias Complacentes os métodos NEH, FM e LN determinaram valores maiores para o parâmetro CN quando comparado com os métodos AS e LS, os quais não são compatíveis com a resposta dessas bacias. Isso pode ser compreendido assumindo o CN como uma variável aleatória. O CN de referência é associado ao valor que divide a amostra do CN em dois grupos iguais com o método NEH e teoricamente com o método FM, isto é, a média dos logaritmos de S corresponde à mediana dos valores não transformados de S (Yuan, 1933 apud HJELMFELT, 1991) ou a um valor próximo da mediana com o método LN. Em geral nas séries estendidas o número de pequenos eventos de chuva supera o número de grandes eventos de chuva. Os pequenos eventos de chuva estão associados a elevados CNs, porque os pequenos eventos associados a baixos CNs não geram escoamento, portanto não são incluídos na amostra. Além disso, existe uma tendência do CN decrescer com a chuva total e isso não é considerado no tratamento estatístico. Assim, a mediana tenderá aos maiores valores do CN, sendo o CN de referência superestimado. Este efeito também foi observado nas bacias de comportamento Padrão, sendo mais significativo nas bacias com as menores médias para o escoamento superficial direto, CC298B, CC4129 e SUM01.

Tabela 4.10. Valores calibrados do CN com diferentes métodos e séries de dados.

Bacia	N	Comportamento	AS		LS		P/S		NEH		FM		LN
			SO	SN	SO	SN	SO	SN	SO	SN	SO	SN	---
CC298D	119	Complacente	45,59	31,01	53,96	43,61	---	89,10	80,76	80,78	80,27	80,67	80,14
EC03	24	Complacente	45,71	31,44	55,09	51,55	---	94,62	73,22	74,87	73,01	73,97	72,82
WBOF	18	Complacente	36,62	34,73	43,18	43,18	---	---	70,79	70,32	72,60	72,78	72,56
WCAP	229	Complacente	58,00	50,77	55,03	51,17	64,35	57,82	81,96	82,39	82,84	83,33	82,55
WPAR	26	Complacente	46,30	36,11	64,00	61,56	---	88,02	86,33	85,29	87,15	87,90	87,03
CC201	477	Padrão	87,76	84,08	88,62	87,10	88,00	83,74	89,06	90,99	89,76	90,72	87,33
CC298B	258	Padrão	66,70	54,64	68,57	65,43	67,98	67,99	78,05	80,96	80,98	81,97	79,68
CC4129	229	Padrão	60,83	45,87	62,92	58,74	62,26	68,55	72,29	74,20	74,30	75,13	73,22
CM247	241	Padrão	78,11	64,17	78,53	73,63	78,40	73,12	80,60	83,83	82,46	84,47	80,11
SUM01	65	Padrão	49,65	46,22	53,24	52,26	53,31	53,31	64,46	64,69	65,90	66,22	64,52
LCM	97	Violento	73,52	67,65	72,33	69,93	73,10	68,36	75,23	77,32	76,24	77,21	73,19
LPC	96	Violento	77,05	71,66	76,24	74,79	76,47	70,81	77,29	77,80	77,65	78,53	74,27
LSC2	97	Violento	88,40	84,99	87,32	86,47	86,76	84,29	85,99	85,68	86,33	87,69	81,62
SUP02	129	Violento	76,82	62,80	75,13	70,85	74,33	64,53	73,40	77,23	76,63	78,11	73,36
SUP07	159	Violento	88,86	81,66	86,40	84,89	85,55	81,18	86,19	87,61	86,48	87,61	82,41

N: número de eventos; AS: Assintótico; LS: Mínimos Quadrados; NEH: National Engineering Handbook; FM: Curva de Frequência; LN: Log-normal; SO: Série ordenada; SN: Série natural.

O método P/S censura os pequenos e médios eventos ( $P/S < 0,46$ ) para evitar o efeito tendencioso de elevados CNs associados a eles no cálculo do CN de referência. Porém isso reduz

a amostra e aumenta a incerteza na estimativa do CN (HAWKINS et al., 1985). No caso de bacias de baixa resposta hidrológica o método elimina a maioria dos eventos e diminui a confiabilidade dos resultados, podendo determinar CNs compatíveis ou não com a resposta da bacia. Além disso, pode não incluir nenhum evento para a calibração do CN, como ocorreu na bacia WBOF com série natural e nas bacias CC298D, EC03, WBOF e WPAR com série ordenada. Em geral, os resultados apresentados na Tabela 4.10 mostram que quanto maior for a resposta hidrológica da bacia, mais próximos são os valores calibrados do parâmetro CN com todos os métodos.

### **4.3.3. Influência do tratamento dos dados na calibração do CN**

Com exceção do método de calibração LN, todos os outros métodos foram aplicados a séries hidrológicas naturais e ordenadas. A diferença entre as médias dos CNs calibrados com série natural e ordenada é significativa para todos os métodos de calibração, de acordo com o teste t emparelhado ao nível de significância de 5%.

Os resultados obtidos com séries naturais foram menores do que aqueles obtidos com séries ordenadas quando os métodos aplicados foram o AS, LS e P/S. Isto ocorreu porque os grandes eventos de chuva associados aos menores valores observados para o parâmetro CN tendem a influenciar o processo de calibração com estes métodos, pois eles procuram CNs que são mais adequados aos grandes eventos. Quando os dados são rearranjados ocorre uma redução da variabilidade amostral, reduzindo a influência dos grandes eventos associados a baixos CNs no processo de calibração. Este efeito é mais significativo nas bacias de comportamento Padrão e Violento, pois a variabilidade do CN com a magnitude da chuva tende a aumentar e é em geral maior do que nas bacias Complacentes. Isto pode ser observado nas Figuras 4.11 e 4.12. Ao contrário, os métodos NEH e FM determinam CNs ligeiramente menores para séries ordenadas do que para séries naturais. Este fato é atribuído a uma pequena redução do efeito tendencioso de pequenos eventos de chuva associados a elevados CNs devido à alteração da distribuição do parâmetro CN com o rearranjo dos dados. Por exemplo, na bacia CC201, 25% dos valores do CN para série natural estão entre 94,0 e 99,6 e para série ordenada estão entre 90,5 e 96,4.

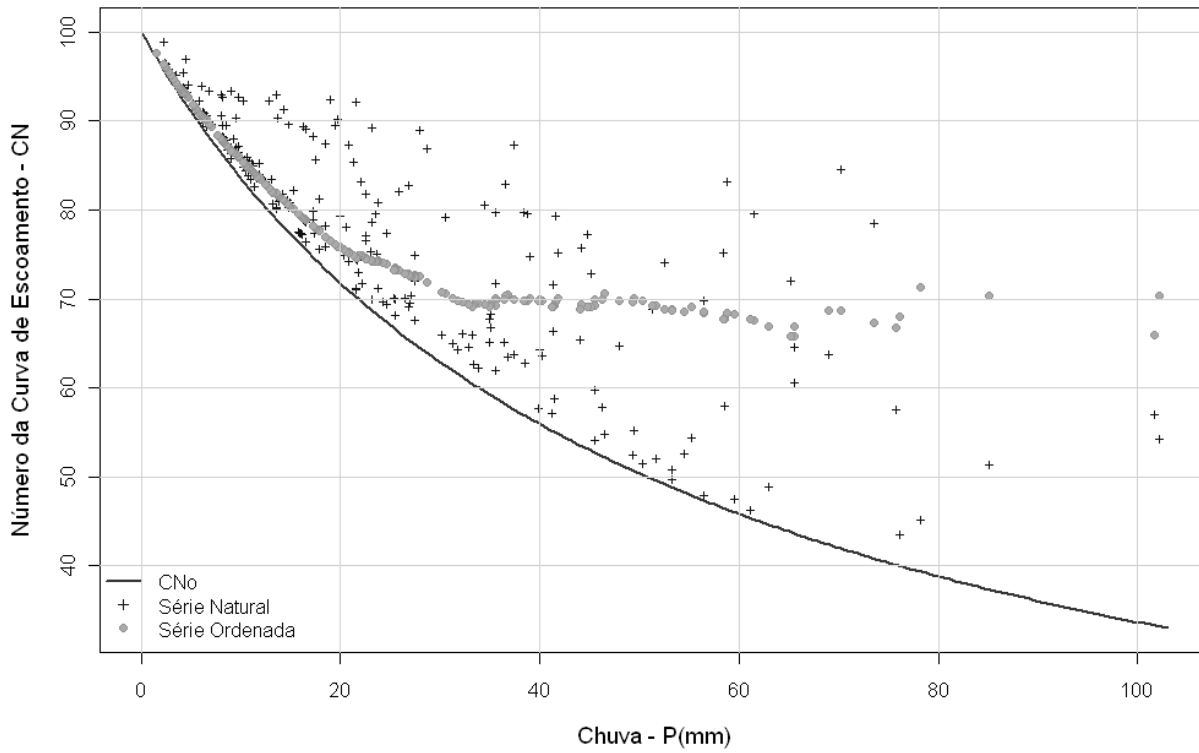


Figura 4.2. Comportamento CN-P da bacia CC298B para série natural e ordenada.

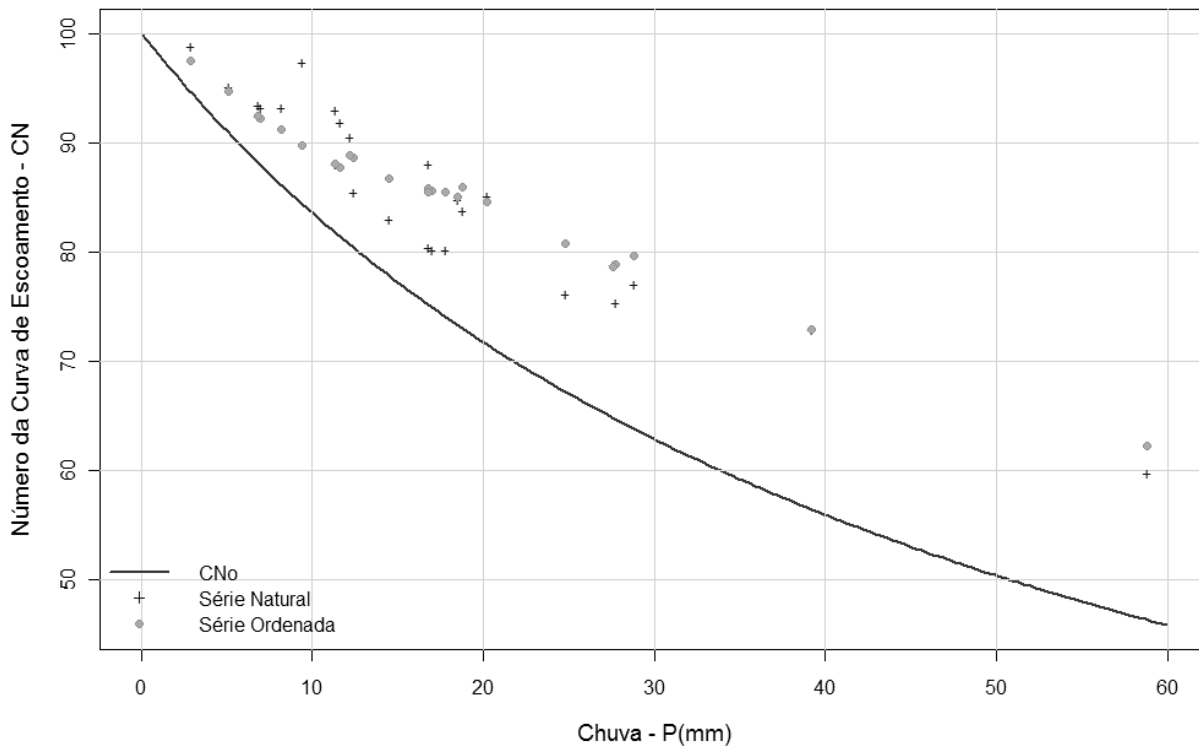


Figura 4.3. Comportamento CN-P da bacia WPAR para série natural e ordenada.

Os métodos LS, P/S, NEH e FM foram desenvolvidos para serem aplicados às séries hidrológicas naturais. O método AS foi desenvolvido para séries ordenadas. Partindo do princípio de que o uso de séries ordenadas ou naturais é uma consequência do modo de aplicação do Método do CN, supõe-se que para aplicação baseada na frequência igualada o uso de séries ordenadas seja mais apropriado quando for calibrar o CN e que séries naturais são mais adequadas para calibrar o CN quando o seu uso for simular eventos. Então, o Método do CN foi aplicado em cada uma das bacias com os valores calibrados do CN pelos diferentes métodos usando séries naturais e ordenadas considerando dois modos de uso. Para o modo de aplicação baseado na frequência igualada a distribuição da chuva observada foi usada como entrada no modelo, ou seja, nenhuma distribuição teórica foi adotada para representar a distribuição da chuva. Para aplicação baseada na simulação de eventos a chuva observada foi usada como entrada no modelo, que neste caso, procurou a partir da chuva estimar o escoamento resultante. O índice de eficiência foi calculado para cada aplicação e os resultados são apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11. Índice de eficiência para aplicação do Método do CN baseada na frequência igualada.

Bacia	N	Comportamento	AS		LS		P/S		NEH		FM		LN
			SO	SN	SO	SN	SO	SN	SO	SN	SO	SN	---
CC298D	119	Complacente	-0,05	-0,21	0,66	-0,13	---	-725,75	-228,63	-229,30	-212,74	-225,64	-208,69
EC03	24	Complacente	-0,83	-1,00	0,51	0,12	---	-1029,4	-54,77	-72,39	-52,80	-62,31	-51,05
WBOF	18	Complacente	-1,00	-1,00	0,18	0,18	---	---	-442,10	-416,53	-553,33	-565,60	-550,64
WCAP	229	Complacente	-0,12	-0,14	-0,08	-0,13	-0,59	-0,11	-11,71	-12,43	-13,23	-14,16	-12,71
WPAR	26	Complacente	-1,63	-1,63	-0,90	-0,96	---	-30,64	-22,85	-19,06	-26,35	-30,01	-25,80
CC201	477	Padrão	0,98	0,90	0,99	0,98	0,99	0,88	0,99	0,95	0,98	0,96	0,98
BCC298B	258	Padrão	0,96	0,38	0,98	0,93	0,98	0,98	0,11	-0,74	-0,75	-1,14	-0,31
CC4129	229	Padrão	0,96	0,22	0,98	0,89	0,98	0,70	0,01	-0,57	-0,61	-0,93	-0,25
CM247	241	Padrão	0,99	0,39	0,99	0,88	0,99	0,86	0,96	0,77	0,88	0,71	0,97
SUM01	65	Padrão	0,95	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	0,30	0,26	0,07	0,01	0,29
LCM	97	Violento	0,96	0,91	0,97	0,95	0,97	0,93	0,94	0,88	0,92	0,88	0,97
LPC	96	Violento	0,98	0,93	0,98	0,98	0,98	0,91	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97
LSC2	97	Violento	0,96	0,95	0,96	0,96	0,96	0,94	0,96	0,95	0,96	0,96	0,88
SUP02	129	Violento	0,95	0,73	0,96	0,92	0,95	0,78	0,95	0,94	0,95	0,93	0,95
SUP07	159	Violento	0,92	0,89	0,95	0,94	0,95	0,88	0,95	0,94	0,95	0,94	0,90
Média	Complacente		-0,72	-0,79	0,07	-0,18	-0,59	-446,49	-152,01	-149,94	-171,69	-179,54	-169,78
	Padrão e Violento		0,96	0,71	0,98	0,94	0,97	0,89	0,71	0,54	0,53	0,43	0,63

N: número de eventos; AS: Assintótico; LS: Mínimos Quadrados; NEH: National Engineering Handbook; FM: Curva de Frequência; LN: Log-normal; SO: Série ordenada; SN: Série natural.

Tabela 4.12. Índice de eficiência para aplicação do Método do CN baseada na simulação de eventos.

Bacia	N	Comportamento	AS		LS		P/S		NEH		FM		LN
			SO	SN	SO	SN	SO	SN	SO	SN	SO	SN	---
CC298D	119	Complacente	-0,21	-0,21	-1,19	-0,20	---	-757,11	-250,13	-250,82	-233,70	-247,04	-229,51
EC03	24	Complacente	-0,94	-1,00	-1,08	-0,69	---	-1061,73	-65,18	-84,04	-63,05	-73,27	-61,17
WBOF	18	Complacente	-1,00	-1,00	0,18	0,18	---	---	-445,38	-419,67	-557,20	-569,52	-554,49
WCAP	229	Complacente	-0,53	-0,33	-0,39	-0,33	-1,26	-0,52	-13,55	-14,31	-15,15	-16,12	-14,60
WPAR	26	Complacente	-1,63	-1,63	-1,31	-1,26	---	-35,07	-26,69	-22,58	-30,47	-34,39	-29,88
CC201	477	Padrão	0,67	0,64	0,66	0,68	0,67	0,63	0,66	0,58	0,64	0,60	0,68
CC298B	258	Padrão	0,18	0,08	0,11	0,21	0,14	0,13	-1,29	-2,33	-2,34	-2,79	-1,82
CC4129	229	Padrão	-0,34	-0,14	-0,49	-0,24	-0,44	-1,30	-2,36	-3,15	-3,20	-3,61	-2,72
CM247	241	Padrão	0,12	0,04	0,11	0,20	0,11	0,20	-0,02	-0,36	-0,19	-0,46	0,02
SUM01	65	Padrão	0,91	0,82	0,93	0,94	0,93	0,93	0,14	0,10	-0,11	-0,17	0,13
LCM	97	Violento	0,64	0,66	0,66	0,67	0,64	0,67	0,59	0,50	0,55	0,51	0,64
LPC	96	Violento	0,79	0,78	0,80	0,80	0,80	0,77	0,79	0,78	0,78	0,76	0,80
LSC2	97	Violento	0,81	0,81	0,82	0,82	0,82	0,81	0,82	0,82	0,82	0,81	0,76
SUP02	129	Violento	0,52	0,51	0,55	0,59	0,57	0,54	0,58	0,51	0,53	0,48	0,58
SUP07	159	Violento	0,69	0,72	0,74	0,75	0,74	0,72	0,74	0,72	0,74	0,72	0,73
Média		Complacente	-0,86	-0,83	-0,76	-0,46	-1,26	-463,61	-160,19	-158,28	-179,91	-188,07	-177,93
		Padrão e Violento	0,50	0,49	0,49	0,54	0,50	0,41	0,06	-0,18	-0,18	-0,31	-0,02

N: número de eventos; AS: Assintótico; LS: Mínimos Quadrados; NEH: National Engineering Handbook; FM: Curva de Frequência; LN: Log-normal; SO: Série ordenada; SN: Série natural.

Os resultados da Tabela 4.11 mostram que para aplicação do Método do CN baseada na frequência igualada o uso de séries ordenadas com o método de calibração LS é um refinamento desnecessário. Contudo, uma melhora no índice de eficiência em torno de 0,1 foi obtida com os métodos de calibração P/S, NEH e FM. Assim, o uso de séries ordenadas com estes métodos pode ser um artifício para reduzir efeitos tendenciosos. Em geral, os resultados obtidos indicam que os métodos AS, LS e P/S são mais adequados para a calibração do CN quando a aplicação do método do CN for baseada no princípio da frequência igualada.

Para aplicação do Método do CN baseada na simulação de eventos, o uso da série ordenada para calibrar o CN não se apresenta vantajoso. Assim, os resultados apresentados na Tabela 4.12 mostram que quando o objetivo for simular eventos os métodos de calibração do CN podem ser usados com a série hidrológica padrão de cada método. Em geral, os resultados obtidos indicam que os métodos AS, LS e P/S são mais adequados para a calibração do CN, a qual é a mesma conclusão obtida para aplicação baseada na frequência igualada.



#### 4.3.4. Comentários gerais e escolha dos métodos de calibração do CN

Estudos como os de Hawkins (1979) e Hawkins (1993) mostraram que o Método do CN não é o mais adequado para representar o escoamento gerado devido à chuva em todas as bacias hidrográficas. Este é o caso das bacias com comportamento Complacente. Como se observou nas Tabelas 4.11 e 4.12 o índice de eficiência resultante da aplicação do Método do CN foi, na maioria dos casos, menores que zero ou próximo deste. Isto significa que nenhum dos métodos de calibração encontrou um CN de referência que representasse a amostra de dados. No comportamento Complacente o CN tende a decrescer com a chuva sem apresentar um valor aparentemente constante para as maiores chuvas contidas na amostra. Hawkins (1979) mostrou que nestes casos o CN é uma função de P e da relação  $Q/P = \text{constante}$ . Isto significa que o modelo linear  $Q = C \cdot P$  é mais apropriado para representar a amostra de dados do que o Método do CN (Hawkins, 1993). No entanto, para eventos extremos não incluídos na amostra de dados é mais provável que ocorra o comportamento Padrão ou Violento, uma vez que para grandes chuvas o conteúdo de água no solo poderá aumentar chegando próximo da saturação ou até mesmo se tornar saturado.

Caso o comportamento Padrão seja assumido para representar os grandes eventos não contidos na amostra, a equação do modelo Padrão do método AS pode ser usada para extrapolar o CN de referência, admitindo então que um valor estável irá ocorrer para chuvas maiores ou muito maiores do que as contidas na amostra. Neste caso, o  $CN_{\infty}$  será dependente da magnitude da maior chuva contida na amostra, ou seja, quanto menor ela for maior será o  $CN_{\infty}$  e vice-versa. Um exemplo desse ajuste é apresentado na Figura 4.4 para a bacia WPAR. Como pode ser observado o CN de referência obtido por extrapolação é 46,3. Com este valor de referência, todos os eventos de escoamento superficial são subestimados, ou melhor, o escoamento superficial será igual a zero para chuvas menores do que 58,9 mm. No caso, por exemplo, do uso dos métodos de calibração NEH, FM e LN com esses dados, o CN de referência é aproximadamente 87, ou seja, é aproximadamente o CN mediano. Se este for usado, o escoamento superficial será subestimado para chuvas menores do que 14 mm e superestimado para os eventos de chuva maiores. Isso mostra que o método de calibração AS busca um CN de referência que seja mais adequado para

os grandes eventos, assim como os métodos LS e P/S. Contudo, estes dois últimos não reconhecem a tendência do CN decrescer com a chuva, não sendo recomendados para extrapolar o CN de referência no caso de bacias Complacentes.

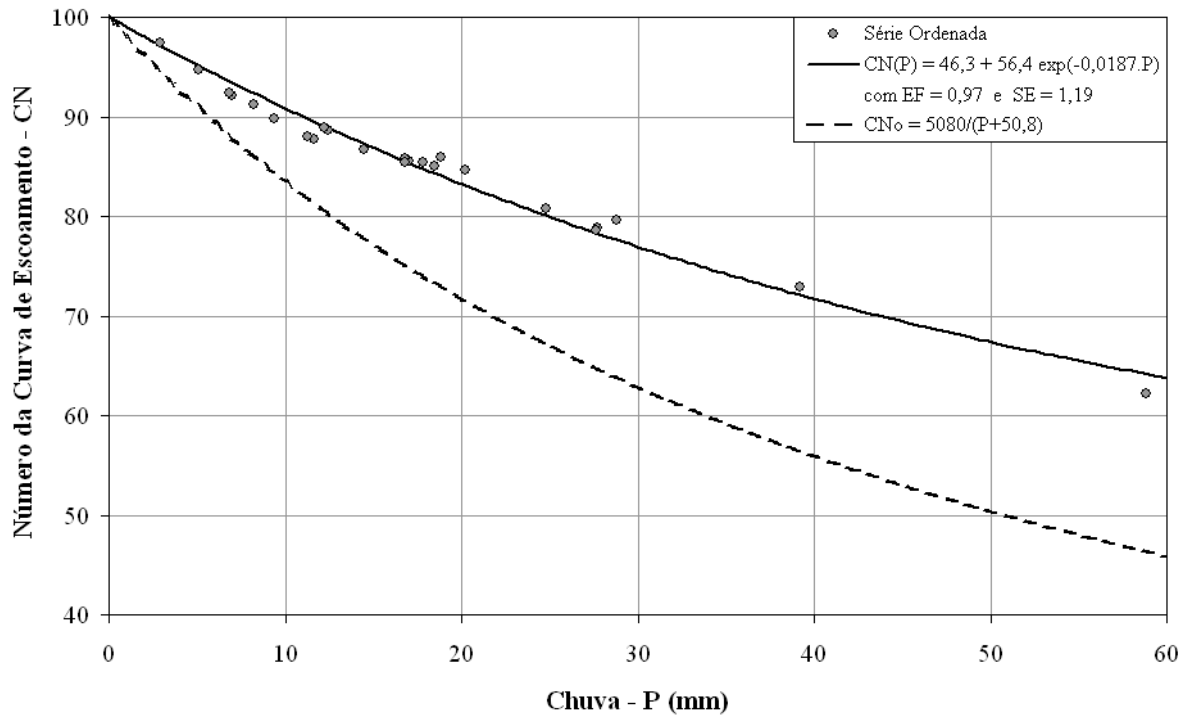


Figura 4.4. Ajuste Assintótico Padrão aos dados observados na bacia WPAR.

A única ressalva que se faz ao usar o método AS Padrão para extrapolar o CN de referência é que comportamento Complacente precede um comportamento Violento, não havendo garantias de qual padrão irá predominar para eventos extremos não contidos na amostra. Portanto, se o comportamento for mesmo declarado como Complacente, o CN de referência não pode ser obtido por nenhum método de calibração e o modelo linear  $Q = C \cdot P$  pode ser indicado para representar a amostra de dados. Um exemplo do ajuste linear aos eventos da bacia WPAR é apresentado na Figura 4.5, nos moldes do princípio da frequência igualada. A distribuição da chuva, suposta para seguir a distribuição log-normal, é usada como entrada no modelo linear.

Em resumo, para que a resposta da bacia possa ser representada adequadamente pelo Método do CN, os valores do parâmetro CN devem tender a um valor aparentemente constante

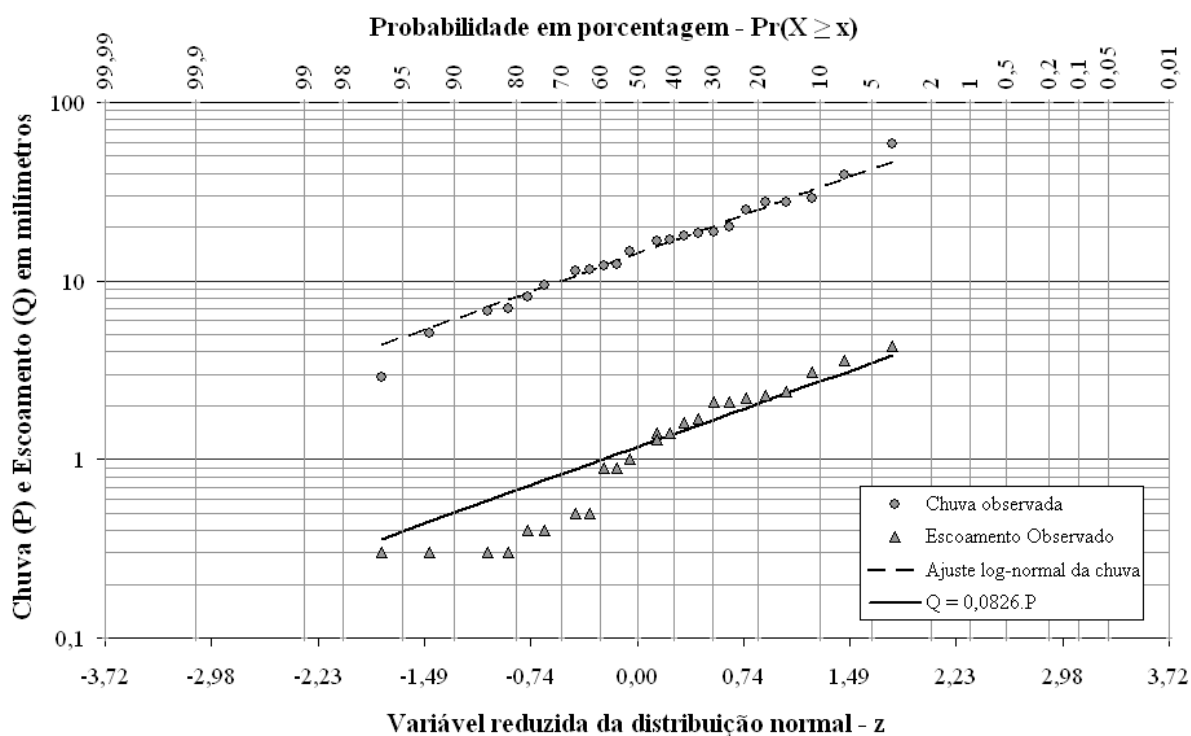


Figura 4.5. Ajuste do modelo linear aos dados da bacia WPAR com base na frequência igualada.

para as maiores chuvas contidas na amostra, de acordo com os comportamentos Padrão e Violento. Isto confirma a intenção original do método, que é a estimativa do escoamento superficial direto para obter, via procedimentos não descritos aqui, vazão de pico e hidrograma de projeto. Por esse motivo os métodos Assintótico, Mínimos Quadrados e P/S foram os que conduziram o Método do CN aos maiores índices de eficiência para as bacias de comportamento Padrão e Violento.

O método Assintótico é o único que reconhece os diferentes tipos de resposta da bacia com relação ao comportamento CN-P, podendo ser aplicado também aos dados de bacias Complacentes. O método P/S censura eventos de modo que a amostra pode ser reduzida, diminuindo a confiabilidade dos resultados. De fato, essa redução é mais pronunciada em bacias de baixa resposta hidrológica. Por exemplo, este método considerou na estimativa do CN de referência da bacia CC4129 apenas 5 eventos com série natural e 6 eventos com série ordenada de um total de 229 eventos. Assim, para a maioria das bacias, sejam elas de baixa, média ou alta resposta hidrológica, os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados são os mais estáveis e determinam CNs que podem ser considerados equivalentes para bacias de comportamento Padrão

e Violento. Além disso, o método dos Mínimos Quadrados é o que determina CNs mais apropriados para as bacias de comportamento Complacente do que os métodos P/S, NEH, FM e LN, muito embora não reconheça a tendência do CN decrescer com a chuva e por esse motivo não possa ser usado para extrapolar o CN de referência caso o comportamento Padrão seja assumido para eventos extremos.

Considerando as particularidades apresentadas, o modo de aplicação do Método do CN e os índices de eficiência apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12, adotou-se os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados para a calibração do parâmetro CN neste trabalho. A aplicação de ambos assegura certa confiança no valor calibrado e permite a conferência de resultados. No entanto, o CN obtido com o método Assintótico, por usar dados ordenados, pode ser mais adequado para uso com o modo de aplicação baseado na frequência igualada. O CN calibrado com o método dos Mínimos Quadrados, por usar dados naturais, pode ser mais adequado para uso com o modo de aplicação baseado na simulação de eventos.

#### **4.4. Determinação do CN para alguns usos e manejos do solo**

Séries hidrológicas de eventos de chuva e escoamento superficial direto observados em 6 pequenas bacias e em 43 parcelas experimentais foram usadas na determinação do parâmetro CN com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados. Com exceção de três bacias hidrográficas, todas as demais possuem um único complexo hidrológico, isto é, um único tipo de uso/cobertura para um mesmo tipo de solo. Para maior clareza e organização, os resultados são apresentados, na medida do possível, por grupos de mesmo tipo de uso da terra ou cultivo.

Devido ao objetivo da calibração neste estudo ser o uso do método para projeto, a preferência para o CN de referência foi dada ao CN calibrado, ou com o método Assintótico ou com o método dos Mínimos Quadrados, que melhor reproduziu a distribuição do escoamento superficial direto a partir da distribuição observada da chuva. Nesta avaliação não foi considerada nenhuma distribuição teórica para representar a distribuição da chuva observada, mas foram considerados apenas eventos com chuva causativa maior do que a abstração inicial.

#### 4.4.1. CN para solo nu

O termo “solo nu” é usado para caracterizar uso do solo nas bacias em que o solo está isento de cobertura superficial e desprotegido da ação erosiva das chuvas. Dados hidrológicos de seis bacias/parcelas experimentais usadas neste estudo possuem esta característica: CC201 localizada no município de Campinas, SP; CM201 localizada no município de Mococa, SP; SUP08 localizada no município de Sumé, PB; EC01 localizada no município de Planaltina, DF; LSC1 e LSC2 localizadas no município de Lajes, SC.

Na Tabela 4.13 são apresentados maiores detalhes das características das bacias, o comportamento CN-P, o número de eventos considerados na calibração do CN e o grupo hidrológico de solo. Caber ressaltar aqui que nenhum valor mínimo para a chuva total foi estabelecido para selecionar os eventos para formar a série hidrológica, como sugerido por Hawkins et al. (2002), porque os pequenos eventos de chuva não apresentaram efeitos tendenciosos na calibração do CN. Contudo, foram incluídos apenas eventos com escoamento superficial direto maior do que zero na série hidrológica a ser analisada. No caso da bacia LSC2 que apresentou comportamento Violento para chuvas maiores do que 18 mm, apenas eventos da série ordenada com  $P > 18$  mm foram considerados para o ajuste do modelo violento. Nenhuma restrição foi feita para a calibração com o método dos Mínimos Quadrados.

Tabela 4.13. Local, nome e algumas características das bacias com solo nu.

Local	GHS	Bacia	Área m <sup>2</sup>	Uso	Manejo	COMP	N
Campinas, SP	A	CC201	100	nu	sem aração	P	477
Mococa, SP	B	CM201	100	nu	sem aração	P	402
Sumé, PB	D	SUP08	100	nu	sem aração	P	100
Planaltina, DF	B	EC01	77	nu	solo submetido a uma aração e gradagem no ano	P	24
Lajes, SC	C	LSC1	77,35	nu	solo submetido a uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano	P	97
		LSC2	77,35	nu	solo submetido a uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano	V	97/69*

GHS = grupo hidrológico do solo de acordo com a classificação hidrológica proposta neste trabalho.

COMP = Comportamento CN-P; P = Padrão; V = Violento.

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero usados para calibrar o CN.

\* 97 eventos com o método dos Mínimos Quadrados e 69 eventos com o método Assintótico Violento.

Os resultados da calibração do CN com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados estão apresentados na Tabela 4.14. Para cada bacia são apresentados na Tabela 4.15 o CN de referência e as medidas estatísticas usadas para avaliar o desempenho dos métodos de calibração em função da precisão do Método do CN em reproduzir a distribuição de frequência do escoamento. Um exemplo desta avaliação é ilustrado na Figura 4.6 para a bacia SUP08 onde se pode observar que só eventos com chuvas observadas maiores do que a abstração inicial (Ia) foram usados na verificação.

Tabela 4.14. Resultados da calibração do CN para bacias com solo nu.

Bacia	Assintótico						Mínimos Quadrados		
	CN <sub>∞</sub>	k	P <sub>90%</sub>	STB	SE	EF	CN	SE	EF
	---	mm <sup>-1</sup>	mm	%	---	---	---	mm	---
CC201	87,76	0,20325	38,0	100,0	1,29	0,748	87,10	5,44	0,675
CM201	87,84	0,14023	45,2	99,8	1,25	0,614	85,04	6,93	0,411
SUP08	89,07	0,31730	39,6	100,0	1,70	0,236	89,41	6,44	0,740
EC01	75,79	0,03889	61,6	90,9	2,47	0,790	77,83	5,64	0,404
LSC1	86,09	0,58394	76,0	100,0	2,39	0,000	85,00	7,54	0,834
LSC2	88,40	0,14269	81,8	100,0	2,21	0,452	86,47	8,54	0,819

CN<sub>∞</sub> e k: parâmetros de ajuste dos modelos Assintótico Padrão e Violento; P<sub>90%</sub>: valor da chuva associado ao quantil 90%; STB: estabilidade; SE: erro padrão; EF: índice de eficiência.

Tabela 4.15. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias com solo nu.

BACIA	Assintótico					Mínimos Quadrados					CN
	Ia	N	EF	SE	EM	Ia	N	EF	SE	EM	
	mm	---	---	mm	mm	mm	---	---	mm	mm	
CC201	7,1	363	0,982	1,41	-0,41	7,5	353	0,972	1,75	-0,80	88
CM201	7,0	354	0,970	1,61	-0,08	8,9	324	0,948	2,16	-1,80	88
SUP08	6,2	91	0,959	2,64	-0,62	6,0	91	0,963	2,49	-0,36	89
EC01	16,2	18	0,800	3,48	-2,59	14,5	20	0,883	2,66	-1,42	78
LSC1	8,2	97	0,967	3,37	-0,25	9,0	96	0,965	3,48	-1,16	87
LSC2	6,7	97	0,958	4,12	1,09	7,9	97	0,959	4,04	-0,72	87

Ia = 0,2.S = abstração inicial; N = número de eventos usados na verificação com P > Ia; EF = índice de eficiência; SE = erro padrão; EM = erro médio; CN = valor do parâmetro CN sugerido como referência para projetos.

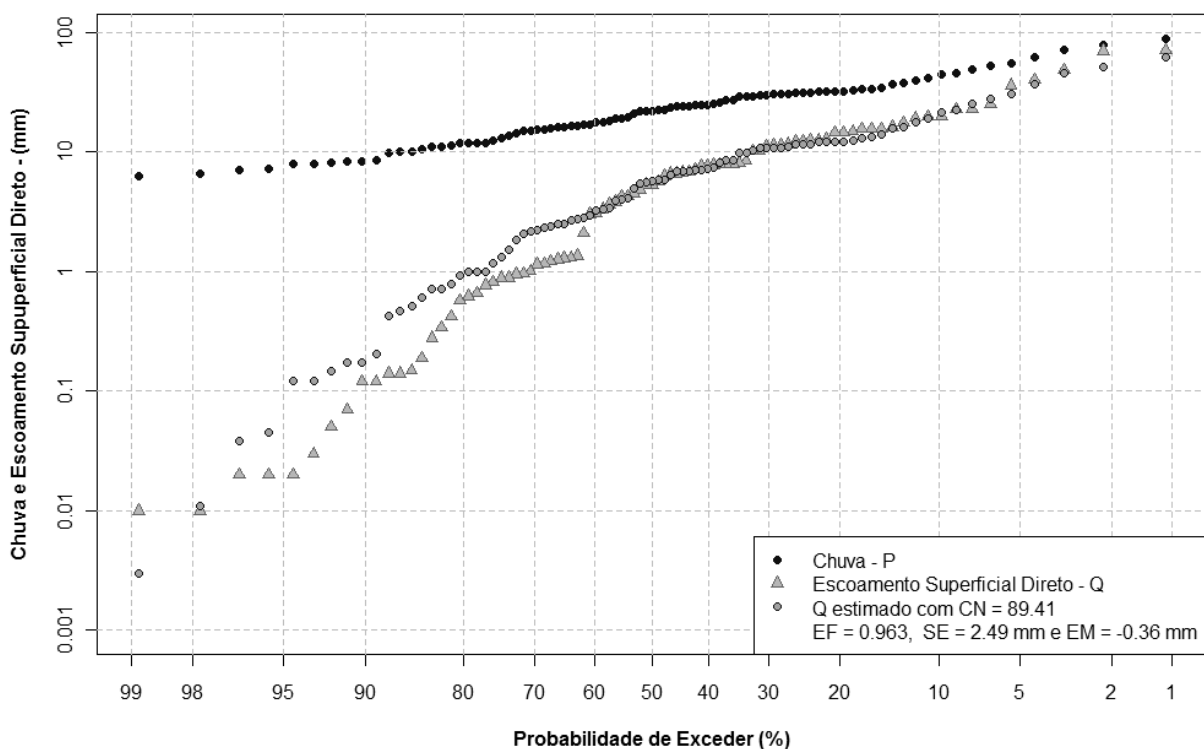


Figura 4.6. Distribuição de frequência da chuva, do escoamento superficial direto observado e calculado com o CN calibrado com o método dos Mínimos Quadrados para a bacia SUP08 sobre papel probabilístico log-normal.

### Comparação com valores tabelados do CN

O NRCS (2004) apresenta para solo nu os seguintes valores de referência para o parâmetro CN: 77 (grupo hidrológico A), 86 (grupo hidrológico B), 91 (grupo hidrológico C) e 94 (grupo hidrológico D). Os solos das bacias analisadas são classificados, de acordo com a classificação hidrológica proposta neste trabalho, como: A (CC201), B (CM201 e EC01), C (LSC1 e LSC2) e D (SUP08). Como pode ser observado na Tabela 4.15, o CN de referência para as bacias CC201 e CM201 são iguais (CN = 88) e diferem do CN da bacia SUP08 (CN = 89) em apenas uma unidade. Estas bacias não possuem o mesmo grupo hidrológico de solo, mas a condição de solo nu é a mesma, ou seja, solo desprotegido e não arado. Sob estas condições, a superfície do solo pode ser mais importante no processo de geração do escoamento superficial do que as condições estruturais do perfil do solo.

Em solos cuja camada superior (horizonte A) é rica em areia fina ou silte é comum, devido à ação impactante da chuva, quando deixado nu, o surgimento de uma fina e densa camada que reduz significativamente a infiltração da água no solo e aumenta o escoamento superficial. Este efeito de selamento superficial também pode ocorrer em solos com horizonte A argiloso, cuja fração argila seja composta principalmente por óxidos de ferro e de alumínio e/ou minerais de argila do grupo da caulinita (LIMA et al., 1990). Nestes solos, os microagregados da superfície podem ser quebrados pela ação impactante das gotas de chuva formando microagregados do tamanho da fração silte ou menores, que irão obstruir os macroporos e mesoporos da superfície do solo, diminuindo significativamente a infiltração, gerando mais escoamento superficial do que no caso destes solos estarem com sua superfície protegida da ação desagregadora da chuva. Essa possibilidade é suportada pelos resultados de Sharma (1987) que encontrou para bacias experimentais com solos arenosos (grupo hidrológico A) nus na região noroeste da Índia CNs variando de 87 a 91, os quais foram resultados da formação de crostas superficiais. Como resultado, os CNs das bacias CC201, CM201 e SUP08 não podem ser comparados com o CN tabelado pelo NRCS (2004) para solo nu. Além disso, parece haver uma tendência a um valor constante do CN próximo de 90 para solos nus sem aração, independente do tipo de solo. Isso pode estar relacionado ao efeito do selamento superficial. As bacias LSC e EC01 embora caracterizadas pelo uso “solo nu” foram submetidas à aração e gradagem, mas não na mesma quantidade durante o ano. A aração e a gradagem aumentam a retenção superficial da água em depressões causadas pela manipulação do solo e permitem que a água retida infiltre no solo e evapore. Considerando que essas condições sejam similares as condições de solo nu do NRCS (2004), verifica-se que o valor do CN de referência para a bacia LSC (CN=87) está mais próximo do CN proposto para grupo hidrológico B (CN=86) e que o CN de referência para a bacia EC01 (CN=78) está mais próximo do CN proposto para o grupo hidrológico A (CN=77).

O solo da bacia LSC, classificado pedologicamente como Cambissolo Húmico alumínico léptico, tem como características principais a textura argilosa, a camada restritiva dentro de 1 metro de profundidade e a taxa de infiltração básica igual a 6 mm/h na camada 0-20 cm. Segundo os critérios do NRCS (2007) este solo é classificado no grupo hidrológico C, assim como o foi pelos critérios da classificação hidrológica proposta neste trabalho. A diferença entre



o valor de referência obtido com dados experimentais e o valor do CN publicado no manual para um solo C e nu é de 4 unidades, distanciando-se em apenas uma unidade do valor limite (CN=88) entre os grupos hidrológicos B e C. Infelizmente a origem dos valores tabelados e publicados do parâmetro CN pelo NRCS (2004) não se encontra documentada e a maioria dos dados experimentais que deram origem a ela se perderam ao longo do tempo (WOODWARD et al., 2002). Assim, existe a incerteza na igualdade de condições superficiais entre as bacias deste estudo e as bacias que deram origem aos valores tabelados, pois o uso “solo nu” é igual, mas o tratamento a que foi submetido pode variar. Além disso, alguns dos valores publicados no manual são valores médios e não de uma única bacia e para alguns casos são extrapolações (NRCS, 2004). Portanto, não é de se esperar que valores calibrados do CN com dados observados sejam iguais aos valores tabelados para condições supostamente similares. Por esse motivo, não é conveniente alterar o grupo hidrológico de um solo tomando como base o CN de referência. No caso da bacia EC01, cujo solo é um Latossolo Vermelho argiloso e foi classificado no grupo hidrológico B pelos critérios da classificação hidrológica proposta neste trabalho, pode segundo os critérios baseados na condutividade hidráulica saturada do NRCS (2007) ser classificado no grupo hidrológico A, como ocorreu com alguns perfis de solos similares no item 4.2. No entanto a indisponibilidade dessa informação não permite uma classificação hidrológica mais precisa para esse solo.

#### **4.4.2. CN para solo sem cultivo**

Dados hidrológicos de 15 parcelas/bacias experimentais caracterizadas como bacias sem cultivo foram usados na calibração do CN. Algumas informações sobre as bacias tal como o local, o comportamento CN-P e o número de eventos considerados na calibração do CN são apresentados na Tabela 4.16. Nenhuma restrição foi feita na seleção da série hidrológica quanto ao valor mínimo para a chuva total, mas apenas eventos com escoamento superficial direto maior do que zero foram considerados. No caso da bacia SUP02 que apresentou comportamento Violento para chuvas maiores do que 30 mm, apenas eventos da série ordenada com  $P > 30$  mm foram considerados para o ajuste do modelo violento. Nenhuma restrição foi feita para a calibração com o método dos Mínimos Quadrados.

As bacias da unidade experimental do Instituto Agronômico de Campinas, em Campinas, SP, foram submetidas a diferentes densidades de cobertura vegetal com restos culturais de milho não picado. As bacias da unidade experimental de Sumé, PB, foram submetidas a dois diferentes tratamentos, os quais podem ser caracterizados como pousio, que é a interrupção do cultivo da terra por um ou mais anos para a recuperação da fertilidade natural. As bacias da unidade experimental da Embrapa Cerrados em Planaltina, DF, servem apenas para ilustrar o efeito do impacto das gotas de chuva e da rugosidade superficial na geração do escoamento superficial. Elas foram cobertas com uma tela de sombreadura - chamadas aqui de sombrite - com uma porcentagem de sombreamento igual a 50%. Os resultados da calibração do CN com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.16. Local, nome e algumas características das bacias sem cultivo.

Local	GHS	Bacia	Área m <sup>2</sup>	Manejo	COMP	N
Campinas, SP	A	CC1133	100	250 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	P	142
		CC1134	100	500 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	P	141
		CC1135	100	1000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	P	141
		CC1136	100	1500 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	P	145
		CC1137	100	2000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	P	138
		CC1138	100	4000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	P	134
		CC1139	100	8000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	P	134
Sumé, PB	D	SUM03	5200	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm	P	202
		SUM04	4800	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm	P	199
		SUP01	100	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm	P	241
		SUP04	100	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm	P	227
		SUP02	100	Vegetação rasteira com cobertura morta	V	129/51*
		SUP03	100	Vegetação rasteira com cobertura morta	P	111
Planaltina, DF	B	EC02	77,35	cobertura de sombrite suspensa a 10 cm acima da superfície do solo	C	24
		EC03	77,35	cobertura de sombrite colocada na superfície do solo	C	24

GHS = grupo hidrológico do solo de acordo com a classificação hidrológica proposta neste trabalho.

COMP = Comportamento CN-P; P = Padrão; C = Complacente; V = Violento.

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero usados para calibrar o CN.

\* 129 eventos com o método dos Mínimos Quadrados e 51 eventos com o método Assintótico Violento.

O CN de referência e as medidas estatísticas usadas para avaliar o desempenho dos métodos de calibração são apresentados na Tabela 4.18, com exceção das bacias EC02 e EC03 que apresentaram comportamento Complacente e por esse motivo apenas os valores do CN de referência são apresentados. Como já discutido no item 4.3.3, a amostra de eventos de uma bacia

Complacente não é adequadamente representada pelo modelo do Método do CN, portanto o CN de referência foi extrapolado usando o modelo do método Assintótico Padrão. As extrapolações para as bacias EC02 e EC03 são apresentadas nas Figuras 4.17 e 4.18, respectivamente.

Tabela 4.17. Resultados da calibração do CN para bacias sem cultivo.

Bacia	Assintótico						Mínimos Quadrados		
	CN <sub>∞</sub>	k	P <sub>90%</sub>	STB	SE	EF	CN	SE	EF
	---	mm <sup>-1</sup>	mm	%	---	---	---	mm	---
CC1133	87,89	0,23206	43,0	100,0	2,11	0,500	86,22	6,56	0,653
CC1134	87,18	0,20949	43,0	100,0	2,05	0,570	85,22	6,65	0,616
CC1135	87,29	0,20770	43,0	100,0	2,19	0,537	85,75	6,73	0,636
CC1136	85,62	0,16407	41,4	99,9	2,17	0,654	82,84	6,61	0,532
CC1137	84,77	0,15520	43,0	99,9	2,14	0,682	81,83	6,54	0,537
CC1138	76,55	0,06920	43,4	95,0	2,13	0,872	74,98	6,80	-0,611
CC1139	65,01	0,04007	43,4	82,4	2,04	0,938	67,22	4,82	-0,986
SUM03	89,24	0,20573	39,0	100,0	1,58	0,456	84,99	6,26	0,718
SUM04	87,60	0,24980	39,0	100,0	1,47	0,569	84,01	5,85	0,755
SUP01	88,66	0,07770	40,6	95,7	2,72	0,266	85,85	8,04	0,437
SUP04	88,88	0,08333	43,7	97,4	1,96	0,429	87,55	5,85	0,787
SUP02	76,82	0,06266	79,4	99,3	2,28	0,759	70,85	7,98	0,586
SUP03	71,50	0,08354	54,0	98,9	1,93	0,918	69,65	6,59	0,721
EC02	49,04	0,02452	61,6	90,9	1,72	0,972	56,63	1,86	-0,781
EC03	45,71	0,02730	61,6	77,9	0,87	0,994	51,55	1,03	-0,694

CN<sub>∞</sub> e k: parâmetros de ajuste dos modelos Assintótico Padrão e Violento; P<sub>90%</sub>: valor da chuva associado ao quantil 90%;

STB: estabilidade; SE: erro padrão; EF: índice de eficiência.

Como pode ser observado na Tabela 4.18, o CN de referência para as bacias da unidade experimental de Sumé submetidas à remoção da vegetação rasteira, quando esta atingia em média 5 cm de altura, é igual ao CN de referência obtido para a parcela com solo nu sem aração (CN=89) para esta mesma unidade experimental. Isto significa que a vegetação espontânea não cobria toda a área e, portanto, não era suficiente para melhorar as condições superficiais do solo e reduzir o escoamento superficial. Além disso, a maior parte do tempo a superfície estava nua. Nas bacias SUP02 e SUP03 a vegetação era roçada quando atingia uma altura média entre 20 e 25 cm, sem retirá-las das parcelas, para servir como cobertura morta. Tal prática de manejo proporcionou uma redução do escoamento superficial e conseqüentemente uma queda de 15 unidades de CN, quando comparado com o CN para a bacia com solo nu desta mesma unidade experimental.

Tabela 4.18. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias sem cultivo.

BACIA	Assintótico					Mínimos Quadrados					CN
	Ia mm	N ---	EF ---	SE mm	EM mm	Ia mm	N ---	EF ---	SE mm	EM mm	
CC1133	7,0	118	0,929	3,13	-0,25	8,1	110	0,915	3,48	-1,34	88
CC1134	7,5	111	0,929	3,06	-0,23	8,8	103	0,912	3,48	-1,48	87
CC1135	7,4	114	0,912	3,54	-0,28	8,4	105	0,898	3,89	-1,28	87
CC1136	8,5	106	0,898	3,41	-0,09	10,5	89	0,876	3,92	-1,77	86
CC1137	9,1	99	0,905	3,29	-0,08	11,3	88	0,884	3,75	-1,72	85
CC1138	15,6	69	0,505	4,46	-0,43	17,0	68	0,559	4,24	-1,07	77
CC1139	27,3	36	0,448	3,94	-1,07	24,8	44	0,389	3,91	-0,43	65
SUM03	6,1	171	0,917	3,60	0,37	9,0	149	0,920	3,70	-2,20	
SUM04	7,2	164	0,950	2,84	0,22	9,7	145	0,941	3,21	-1,85	89
SUP01	6,5	196	0,671	6,41	-1,05	8,4	180	0,658	6,66	-2,87	
SUP04	6,4	192	0,883	4,52	-0,94	7,2	184	0,881	4,61	-1,89	
SUP02	15,3	94	0,945	3,34	1,57	20,9	75	0,912	4,65	-1,10	74
SUP03	20,2	69	0,955	3,26	-0,19	22,1	66	0,939	3,87	-1,01	
EC02	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	49
EC03	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	46

Ia = 0,2.S = abstração inicial; N = número de eventos usados na verificação com P > Ia; EF = índice de eficiência; SE = erro padrão; EM = erro médio; CN = valor do parâmetro CN sugerido como referência para projetos.

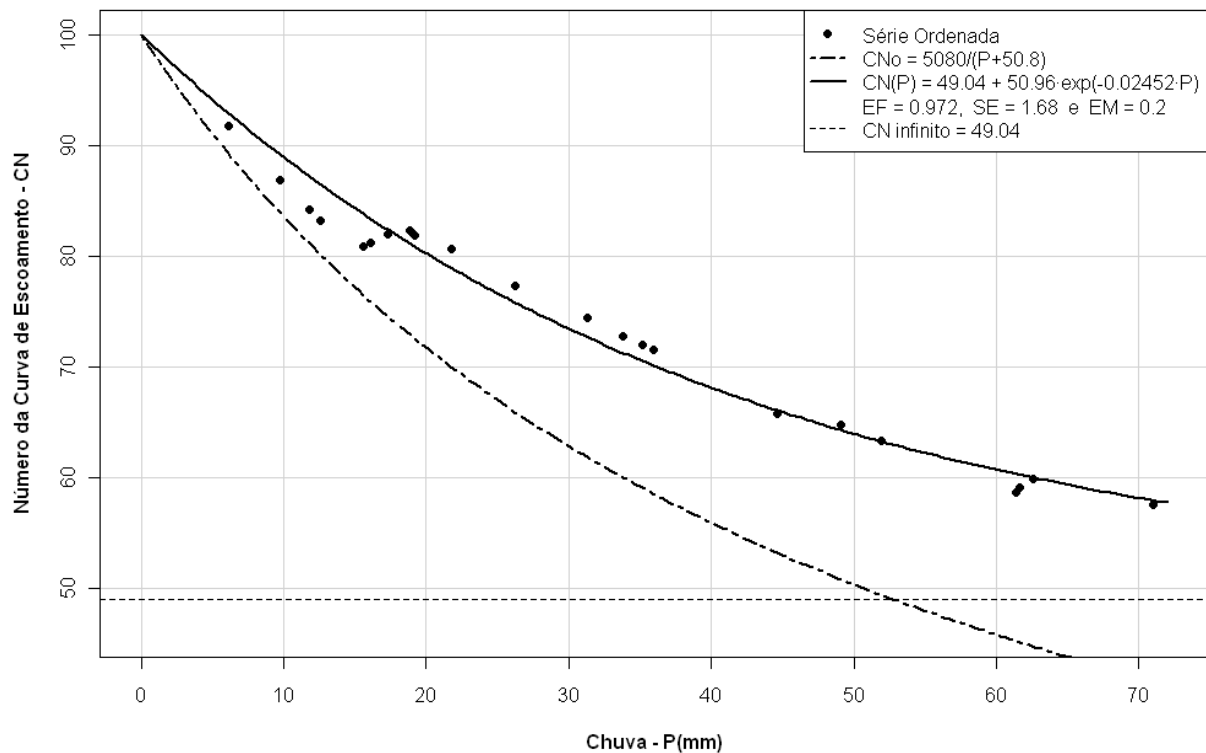


Figura 4.7. Ajuste Assintótico Padrão aos dados observados na bacia EC02.

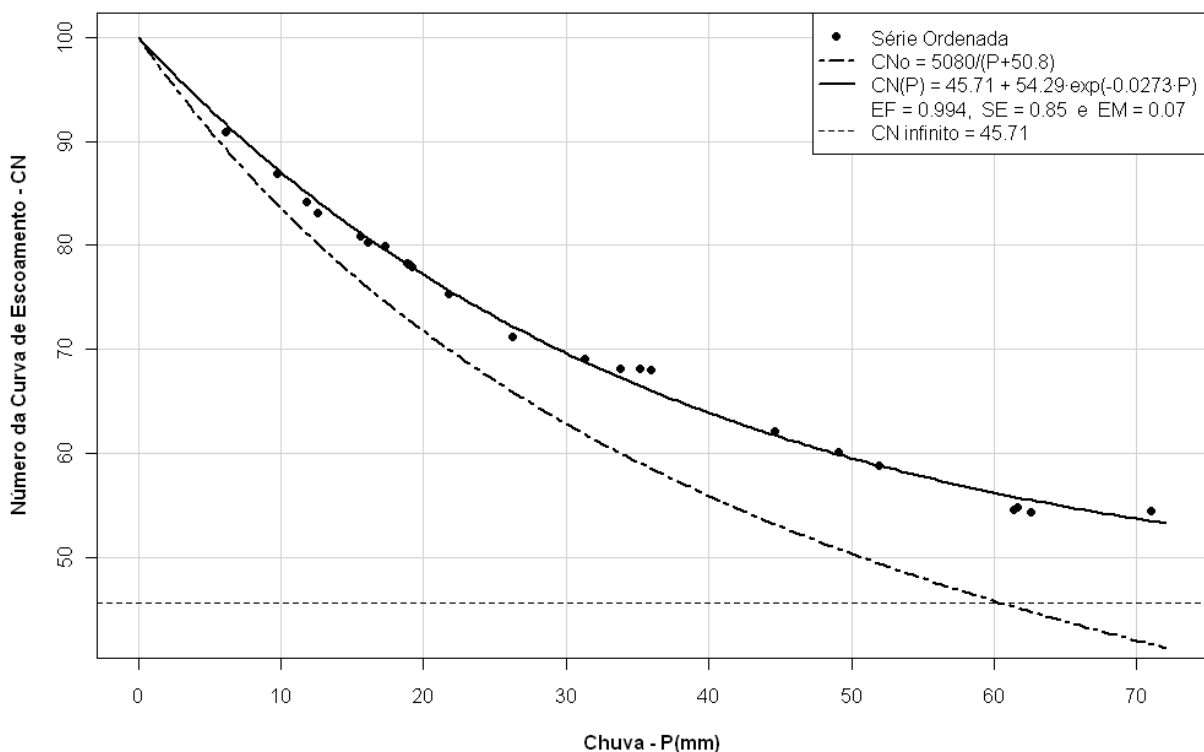


Figura 4.8. Ajuste Assintótico Padrão aos dados observados na bacia EC03.

A evidência do efeito da cobertura do solo na redução do CN também é notada nas bacias EC02 e EC03 quando comparadas com o CN da bacia EC01. A redução foi tão significativa que o comportamento do CN-P mudou de Padrão (bacia EC01, solo nu) para Complacente, como apresentado nas Figuras 4.7 e 4.8. Isso significa que houve uma grande redução do escoamento superficial direto devido à proteção artificial da superfície do solo. Comparado com o CN da bacia EC01 (CN=78) a redução foi de 29 e 32 unidades de CN, respectivamente para as bacias EC02 e EC03. Isso indica que o impacto das gotas de chuva tem grande influência na geração do escoamento superficial em solos nus não arados. Isto quer dizer que a chuva pode desagregar o solo e proporcionar a formação do selo superficial, reduzindo assim a infiltração da água no solo. De fato, os resultados apresentados na Tabela 4.17 mostram que a proteção do solo contra os impactos das gotas de chuva é importante para o controle do escoamento superficial e conseqüentemente da erosão hídrica. Contudo, apenas as bacias da unidade experimental de Campinas fornecem alguma informação a respeito da quantidade de cobertura vegetal mínima necessária para que se possa ter uma redução do escoamento superficial.

Para uma noção da cobertura superficial proporcionada pelos resíduos culturais, a relação entre densidade de resíduos e porcentagem de cobertura do solo obtida por Lopes et al. (1987) foi usada para estimar as porcentagens de cobertura correspondentes as densidades aplicadas as bacias experimentais do IAC. Estas estimativas estão apresentadas na Tabela 4.19, onde pode ser observado que a cobertura do solo da bacia CC1135 é estimada em 27 %.

Tabela 4.19. Estimativa das porcentagens de cobertura do solo para as bacias sem cultivo da unidade experimental do IAC em Campinas com a equação de Lopes et al. (1987).

<b>Bacia</b>	<b>Resíduo de milho CR (kg/ha)</b>	<b>Cobertura do solo CS (%)</b>
CC201	0	0
CC1133	250	7,5
CC1134	500	14,5
CC1135	1000	26,9
CC1136	1500	37,5
CC1137	2000	46,5
CC1138	4000	71,4
CC1139	8000	91,8

$$CS = 100 \cdot (1 - e^{-0,000313CR})$$

Colocando num gráfico os CNs de referência para as bacias de Campinas (Tabela 4.18) e suas correspondentes densidades de cobertura, pode ser observada a variabilidade do CN de referência com a densidade de cobertura vegetal de milho deixada na superfície do solo. Isto está ilustrado na Figura 4.9. Nesta figura é observada uma redução exponencial no valor do CN para densidades de cobertura maiores do que 0,10 kg/m<sup>2</sup> (1000 kg/ha).

Na Figura 4.10 pode ser observado que a maior parte da superfície do solo na bacia CC1135 está sob a condição de solo nu não arado e que a estimativa feita e apresentada na Tabela 4.19 para a cobertura com resíduos culturais de milho não picados está de acordo com a ilustração. Portanto, os resultados sugerem que para se ter uma redução no escoamento superficial a cobertura da superfície do solo deve ser maior do que 30 %.

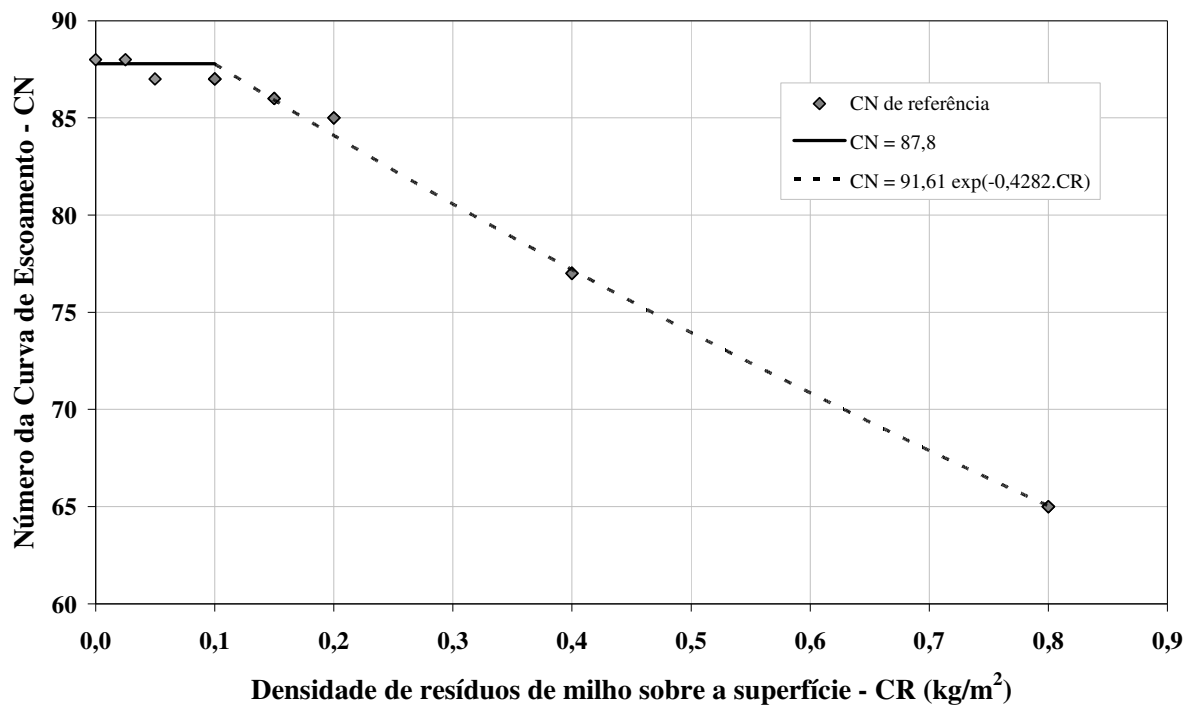


Figura 4.9. Relação entre o parâmetro CN e a densidade de resíduos de milho sobre o solo.



Figura 4.10. Bacia CC1135 com 1000 kg/ha de resíduos de milho sobre a superfície. Fonte: De Maria (1995).

Na Figura 4.9 observa-se que o escoamento superficial direto foi reduzido significativamente com o aumento da cobertura do solo por restos culturais de milho. Este fato pode estar relacionado à redução da velocidade do escoamento, devido ao aumento da rugosidade superficial, e ao aumento da infiltração, devido à redução da energia do impacto das gotas de chuva proporcionada pela cobertura vegetal morta, evitando assim a formação da superfície encrostada (selo superficial) que limita a infiltração (MEYER et al., 1970; CRUZ et al., 2006). Além disso, a matéria orgânica da palhada auxilia na manutenção da umidade do solo, permite o desenvolvimento da atividade biológica e melhora a agregação do solo (BRADY e WEIL, 2000). Como resultado o número de macroporos conectados à superfície do solo também aumenta, os quais podem contribuir para melhorar a infiltrabilidade e a condutibilidade do solo. Assim, com base nos resultados obtidos para Campinas, tem-se que o CN para o Latossolo Vermelho Distroférico de Campinas sofre uma redução devido à quantidade de resíduo cultural de cobertura do solo, de acordo com a relação empírica:

$$CN = \begin{cases} 87,8 & \text{para } CR \leq 0,10 \text{ kg/m}^2 \\ 91,61 \cdot e^{-0,4282 \cdot CR} & \text{para } 0,10 < CR \leq 0,80 \text{ kg/m}^2 \end{cases} \quad (EF = 0,997)$$

sendo CN o número da curva de escoamento superficial direto e  $CR$  a densidade de resíduos culturais de milho sobre a superfície do solo em  $\text{kg/m}^2$ .

#### 4.4.3. CN para a cultura de milho

Dados hidrológicos de 10 parcelas/bacias experimentais, do Instituto Agrônomo de Campinas, cultivadas com milho, foram usados para calibrar o parâmetro CN. Duas estão localizadas no município de Mococa, SP, e oito no município de Campinas, SP. Estas bacias foram submetidas a diferentes tipos de manejo do solo tal como os preparos com grade pesada e convencional que prevê aração e gradagem e os preparos que trabalham com resíduos culturais queimados, incorporados e na superfície.



Informações sobre as bacias e o número de eventos usados na calibração são apresentados na Tabela 4.20. Os resultados da calibração do CN com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados estão apresentados na Tabela 4.21. Para a calibração apenas eventos com escoamento superficial direto maior que zero foram considerados na série hidrológica. O CN de referência e as medidas estatísticas usadas para avaliar o desempenho dos métodos de calibração são apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.20. Local, nome e algumas características das bacias cultivadas com milho.

Local	GHS	Bacia	Área m <sup>2</sup>	Manejo	COMP	N
Campinas, SP	A	CC246	100	restos culturais queimados e plantio morro abaixo	P	351
		CC247	100	restos culturais incorporados e plantio morro abaixo	P	325
		CC248	100	restos culturais incorporados e plantio em contorno	P	330
		CC249	100	restos culturais na superfície e plantio morro abaixo	P	266
		CC4102	1875	preparo convencional e cultivos mecânicos	P	172
		CC4105	1875	plantio direto	P	174
		CC4129	1875	preparo com grade pesada e plantio morro abaixo	P	229
		CC4131	1875	plantio direto morro abaixo	P	193
Mococa, SP	B	CM247	100	restos culturais incorporados e plantio morro abaixo	P	241
		CM249	100	restos culturais na superfície e plantio morro abaixo	P	158

GHS = grupo hidrológico do solo de acordo com a classificação hidrológica proposta neste trabalho.

COMP = Comportamento CN-P; P = Padrão; C = Complacente; V = Violento.

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero usados para calibrar o CN.

Tabela 4.21. Resultados da calibração do CN para bacias cultivadas com milho.

Bacia	Assintótico						Mínimos Quadrados		
	CN <sub>∞</sub>	k	P <sub>90%</sub>	STB	SE	EF	CN	SE	EF
	---	mm <sup>-1</sup>	mm	%	---	---	---	mm	---
CC246	67,11	0,05982	45,4	93,4	1,06	0,983	64,08	2,97	0,058
CC247	63,40	0,05113	45,4	90,2	0,97	0,988	61,11	2,45	0,048
CC248	61,13	0,04682	45,8	88,3	0,83	0,992	58,28	2,09	-0,008
CC249	54,26	0,03751	47,7	83,3	0,39	0,999	51,41	1,20	-0,342
CC4102	56,09	0,04244	50,4	88,2	1,42	0,976	56,05	2,20	-0,139
CC4105	54,66	0,04112	48,7	86,5	2,15	0,954	52,69	2,41	-0,078
CC4129	60,83	0,05001	50,3	91,9	0,43	0,997	58,74	3,50	-0,239
CC4131	53,35	0,03719	54,3	86,7	1,03	0,989	52,59	1,99	-0,951
CM247	78,11	0,09864	51,2	99,4	0,79	0,959	73,63	6,34	0,201
CM249	53,46	0,04080	55,6	89,7	0,91	0,991	47,93	1,78	-0,138

CN<sub>∞</sub> e k: parâmetros de ajuste dos modelos Assintótico Padrão e Violento; P<sub>90%</sub>: valor da chuva associado ao quantil 90%;

STB: estabilidade; SE: erro padrão; EF: índice de eficiência.

Tabela 4.22. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias cultivadas com milho.

BACIA	Assintótico					Mínimos Quadrados					CN
	Ia mm	N ---	EF ---	SE mm	EM mm	Ia mm	N ---	EF ---	SE mm	EM mm	
CC246	24,9	116	0,903	1,47	-0,66	28,5	95	0,725	2,62	-1,54	67
CC247	29,3	80	0,828	1,82	-0,76	32,3	67	0,688	2,61	-1,37	63
CC248	32,3	69	0,789	1,79	-0,63	36,4	55	0,615	2,57	-1,18	61
CC249	42,8	36	0,892	0,61	-0,26	48,0	27	0,703	1,05	-0,55	54
CC4102	39,8	34	0,582	2,61	-0,71	39,8	33	0,576	2,66	-0,74	56
CC4105	42,1	30	0,484	3,10	-0,93	45,6	24	0,328	3,90	-1,53	55
CC4129	32,7	76	0,981	0,66	0,05	35,7	61	0,952	1,15	-0,29	61
CC4131	44,4	33	0,253	2,16	0,16	45,8	30	0,341	2,11	0,03	53
CM247	14,2	162	0,989	0,83	-0,03	18,2	133	0,885	2,94	-1,84	78
CM249	44,2	29	0,752	1,35	-0,18	55,2	18	0,155	1,24	-0,98	53

Ia = 0,2.S = abstração inicial; N = número de eventos usados na verificação com  $P > Ia$ ; EF = índice de eficiência;

SE = erro padrão; EM = erro médio; CN = valor do parâmetro CN sugerido como referência para projetos.

Os resultados da Tabela 4.22 mostram que o tratamento ou manejo das bacias com restos culturais deixados na superfície (CC249) pode ser considerado igual ao das bacias sob plantio direto (CC4105 e CC4131). Isto é válido porque o sistema de plantio direto é uma técnica de cultivo conservacionista na qual se procura manter o solo sempre coberto por plantas em desenvolvimento e por resíduos vegetais. Essa cobertura tem por finalidade protegê-lo do impacto das gotas de chuva, do escoamento superficial e das erosões hídrica e eólica (CRUZ et al, 2006). Nesse sistema, o processo de semeadura é feito em solo não revolvido, no qual a semente é colocada em sulcos ou covas, com largura e profundidade suficientes para adequada cobertura e contato das sementes com a terra (CRUZ et al, 2006). Sendo assim, um CN igual a 54 pode ser usado como referência sob estas condições. Uma ilustração do cultivo de milho no sistema de plantio direto é apresentada na Figura 4.11.

As bacias da unidade experimental de Mococa foram submetidas aos mesmos tratamentos das bacias CC247 e CC249 da unidade experimental de Campinas (ver Tabela 4.20). Uma vez que os solos destas bacias foram classificados em grupos hidrológicos distintos, era esperada uma diferença entre os CNs de referência destes dois locais. Contudo, apenas o CN de referência para as bacias CC247 e CM247 estão de acordo com o esperado, um valor maior para Mococa. Para as bacias com cobertura morta sobre a superfície não houve diferença entre os

valores calibrados para o parâmetro CN. Isso pode ser devido à cobertura da superfície com resíduos de milho. Essa cobertura morta fornece proteção contra o impacto das gotas de chuva, absorvendo a energia cinética da chuva, não restando energia suficiente para provocar a desagregação do solo, reduzindo o volume e a velocidade do escoamento superficial devido ao selamento superficial, aumentando a infiltração e diminuindo as perdas de água (MEYER et al., 1970; CRUZ et al., 2006). Além disso, com a sua decomposição, incorpora matéria orgânica ao solo, necessária a uma maior e mais rica atividade microbiana, o que permite maior reciclagem de nutrientes e melhor agregação do solo. Então, parece que os efeitos da cobertura do solo são mais significativos do que a diferença entre estes solos argilosos pertencentes aos grupos hidrológicos A e B.



Figura 4.11. Sistema de plantio direto. Fonte: Moreira e Marucci (2008).

### Comparação com valores tabelados do CN

A cultura do milho é classificada como “plantios em linha” na tabela de valores de referência para o parâmetro CN (NRCS, 2004). Nenhuma referência é dada para sistemas de plantio direto nestas tabelas. Então, a comparação será feita em valores médios para os grupos

hidrológicos, excluindo da comparação as bacias com plantio direto ou restos culturais na superfície. Além disso, supõe-se que todas as outras condições tal como altura da planta, espaçamento entre linhas, densidade de plantio, tempo de germinação, desenvolvimento e maturação sejam a mesma daquelas usadas na elaboração da tabela do CN, mesmo sabendo que isso pode não ser verdade, pois aqueles valores não são especificamente para a cultura do milho, mas também para outras culturas tal como soja e sorgo que são plantados em linha. Tomando como base os valores do CN para plantios em linha publicados para os grupos hidrológicos A e B tem-se:

- grupo hidrológico A: mínimo = 61; máximo = 72; média = 66,3;
- grupo hidrológico B: mínimo = 70; máximo = 81; média = 75,7.

A média dos valores de referência para as bacias não submetidas ao plantio direto da unidade experimental de Campinas é de 62 com mínimo de 56 (CC4102) e máximo de 67 (CC246). Para a unidade experimental de Mococa, apenas uma bacia pode ser comparada, a CM247 com CN = 78. Como podem ser observados, estes resultados estão em geral de acordo com os valores tabelados pelo NRCS (2004). No entanto, estes resultados podem ser meramente coincidências devido à suposição de igualdade entre diferentes cultivos usada na elaboração das tabelas do CN. Os valores do parâmetro CN publicados no “National Engineering Handbook” são apenas referência e não refletem as condições reais de uma bacia. Estas são definidas pela resposta da bacia a eventos de chuva (HAWKINS, 2006 - comunicação pessoal).

#### **4.4.4. CN para a cultura de soja e trigo em rotação**

Dados hidrológicos de chuva e escoamento superficial direto foram obtidos para parcelas/bacias experimentais cultivadas com soja e trigo em rotação. Quatro destas bacias são da unidade experimental do Instituto Agrônomo de Campinas, em Campinas, SP, e quatro são da unidade experimental da Universidade Estadual de Santa Catarina, em Lajes, SC. Informações sobre as bacias e o número de eventos usados na calibração são apresentadas na Tabela 4.23. Os resultados da calibração do CN com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados estão apresentados na Tabela 4.24. O CN de referência e as medidas estatísticas usadas para avaliar o

desempenho dos métodos de calibração são apresentados na Tabela 4.25, com exceção da bacia CC252, que apresentou comportamento Complacente e por esse motivo apenas o valor do CN de referência obtido por extrapolação com o modelo do método Assintótico Padrão é apresentado, conforme mostra a Figura 4.12.

Tabela 4.23. Local, nome e algumas características das bacias cultivadas com soja e trigo em rotação.

Local	GHS	Bacia	Área m <sup>2</sup>	Manejo	COMP	N
Campinas, SP	A	CC250	100	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos incorporados e plantio morro abaixo	P	339
		CC251	100	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos queimados e plantio morro abaixo	P	390
		CC252	100	restos na superfície e plantio direto morro abaixo/restos na superfície e plantio direto morro abaixo	C	270
		CC253	100	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos na superfície e plantio morro abaixo	P	363
Lajes, SC	C	LCM	77,35	Cultivo mínimo: solo submetido a uma escarificação e uma gradagem, duas vezes ao ano	V	97/45*
		LPC	77,35	Preparo convencional: solo submetido a uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano	V	96/45**
		LSD1	77,35	Semeadura direta: semeadura sem mobilização prévia do solo	P	97
		LSD2	77,35	Semeadura direta: semeadura sem mobilização prévia do solo	P	94

GHS = grupo hidrológico do solo de acordo com a classificação hidrológica proposta neste trabalho.

COMP = Comportamento CN-P; P = Padrão; C = Complacente; V = Violento.

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero usados para calibrar o CN.

\* 97 eventos com o método dos Mínimos Quadrados e 45 eventos com o método Assintótico Violento.

\*\* 96 eventos com o método dos Mínimos Quadrados e 45 eventos com o método Assintótico Violento.

Tabela 4.24. Resultados dos métodos de calibração do CN para bacias cultivadas com soja e trigo em rotação.

Bacia	Assintótico						Mínimos Quadrados		
	CN <sub>∞</sub>	k	P <sub>90%</sub>	STB	SE	EF	CN	SE	EF
	---	mm <sup>-1</sup>	mm	%	---	---	---	mm	---
CC250	71,33	0,07467	43,2	96,0	1,53	0,953	70,01	5,30	-0,075
CC251	75,09	0,08873	41,3	97,4	1,56	0,937	70,86	5,33	-0,215
CC252	47,74	0,03140	45,5	76,0	0,64	0,996	50,04	1,31	-2,754
CC253	68,74	0,06335	43,0	93,4	1,36	0,967	66,19	4,07	-0,486
LCM	73,52	0,10076	94,1	100,0	2,61	0,186	69,93	6,84	0,672
LPC	77,05	0,08765	94,1	100,0	2,51	0,352	74,79	6,34	0,803
LSD1	58,35	0,04175	76,0	95,8	1,85	0,956	57,62	4,68	0,531
LSD2	57,09	0,04378	76,2	96,4	1,65	0,965	57,41	5,90	0,212

CN<sub>∞</sub> e k: parâmetros de ajuste dos modelos Assintótico Padrão e Violento; P<sub>90%</sub>: valor da chuva associado ao quantil 90%;

STB: estabilidade; SE: erro padrão; EF: índice de eficiência.

Tabela 4.25. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias cultivadas com soja e trigo em rotação.

BACIA	Assintótico					Mínimos Quadrados					CN
	Ia mm	N ---	EF ---	SE mm	EM mm	Ia mm	N ---	EF ---	SE mm	EM mm	
CC250	20,4	155	0,945	1,65	-0,60	21,8	146	0,917	2,07	-0,96	71
CC251	16,9	191	0,850	2,44	-0,28	20,9	159	0,753	3,32	-1,76	75
CC252	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	48
CC253	23,1	141	0,676	2,71	-0,49	25,9	118	0,659	2,96	-1,08	66
LCM	18,3	67	0,959	2,76	0,54	21,8	56	0,945	3,38	-1,45	73
LPC	15,1	80	0,980	2,16	0,69	17,1	72	0,975	2,48	-0,58	77
LSD1	36,3	32	0,916	3,00	-1,23	37,4	30	0,895	3,42	-1,69	58
LSD2	38,2	29	0,901	3,30	-0,95	37,7	29	0,907	3,19	-0,77	

Ia = 0,2.S = abstração inicial; N = número de eventos usados na verificação com P > Ia; EF = índice de eficiência;

SE = erro padrão; EM = erro médio; CN = valor do parâmetro CN sugerido como referência para projetos.

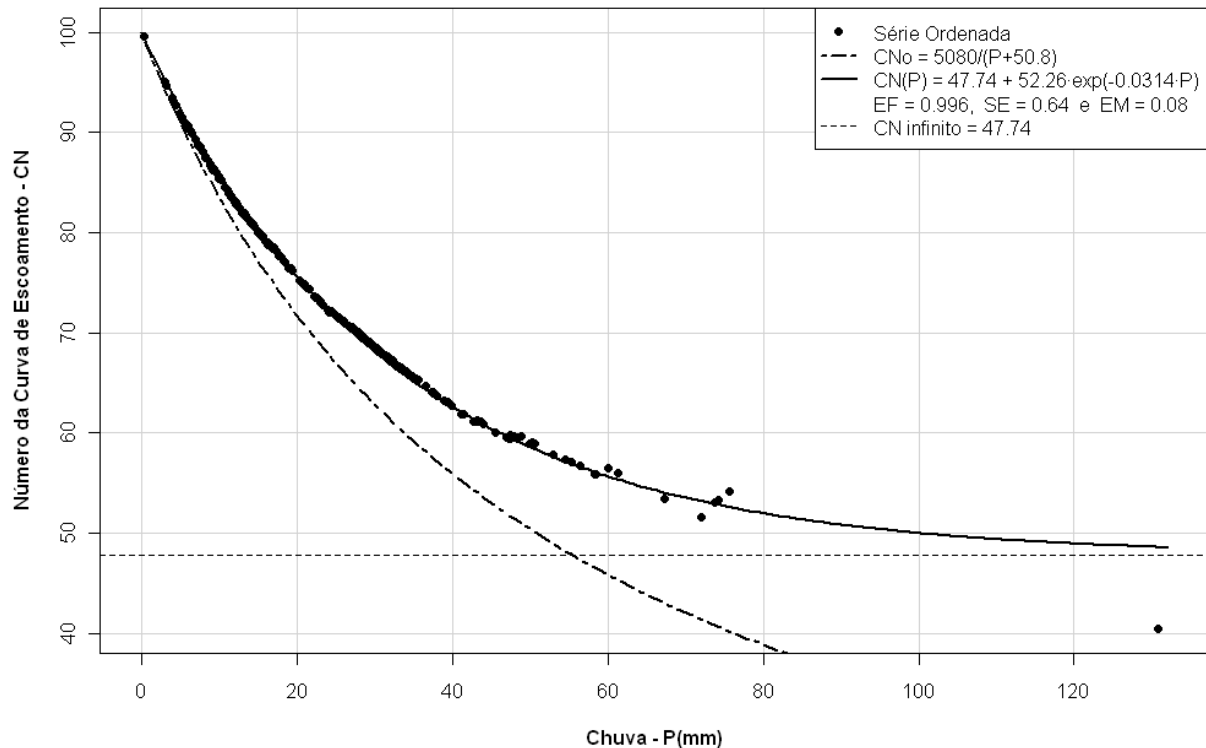


Figura 4.12. Ajuste do modelo Assintótico Padrão aos dados da bacia CC252 mostrando comportamento Complacente.

Como pode ser observado na Tabela 4.25, o sistema de plantio direto é o que reduz significativamente o escoamento superficial e isso foi refletido nos baixos valores do CN de referência obtido para as bacias de Campinas (CC252, CN = 48; ver Figura 4.12) e de Lajes (LSD, CN = 58). Estes valores também mostram certa coerência com relação à classificação hidrológica dos solos destas bacias, sendo esperado maior CN para Lajes. Com relação aos outros tipos de manejo não é possível uma comparação direta, pois os manejos aplicados às bacias não são equivalentes. De qualquer forma, observa-se que a queima dos resíduos é o tipo de manejo que resulta em maior escoamento superficial. Isso pode ser resultado do surgimento de uma camada superficial hidrofóbica. Este efeito de repelência à água tem sido verificado em solos de florestas após sua queima, com redução da infiltração e aumento do escoamento superficial (e.g. ROBICHAUD, 2000).

#### **4.4.5. CN para a cultura de cana-de-açúcar**

No Brasil a cana-de-açúcar é um dos cultivos mais importantes. Em 2006 a área cultivada com cana-de-açúcar foi de aproximadamente 6,2 milhões de hectares, os quais corresponderam a 11 por cento do total da área cultivada com culturas temporárias (IBGE, 2007).

A cultura da cana não irrigada no Brasil requer normalmente 12 a 18 meses a partir do plantio para ser colhida, dependendo da espécie. A colheita consiste em cortar o tronco próximo a superfície, deixando somente as raízes. No Estado de São Paulo as atividades de preparo e plantio da cana-de-açúcar são feitas a cada três anos dependendo do tipo de solo, sendo as plantas deixadas para brotar após a colheita do primeiro e do segundo ano. Na bacia CC298 foi usada esta prática, mas na bacia CC299 as atividades de preparo e plantio foram realizadas apenas no primeiro ano do experimento, permanecendo a cana-de-açúcar adulta até o final dele. A bacia CC298 estava plantada com cana-de-açúcar antes do início deste experimento.

A análise gráfica dos dados para a cultura da cana-de-açúcar revelou uma mudança notável no comportamento do CN com a chuva total após o sétimo mês de plantio/replantio. Essa

mudança de comportamento foi observada ao plotar o CN versus a chuva total usando dados ordenados.

Devido a essa observação foram definidos duas sub-amostras para a calibração do CN: (a) Cobertura Parcial: todos os eventos de chuva dentro do período de 0 a 7 meses após o plantio ou replantio foram incluídos na amostra; (b) Cobertura Completa: todos os eventos dentro do período de 8 a 12 meses após o plantio/replanteio e dentro do período de 0 a 12 após a colheita/corte foram incluídos na amostra. A cobertura parcial apresentou comportamento Padrão e a cobertura completa apresentou comportamento Complacente, conforme mostram as Figuras 4.13 e 4.14. A mudança de comportamento foi resultado da redução do escoamento superficial.

Para ambos os períodos, cobertura parcial e cobertura completa, a equação do comportamento Padrão foi usada com o método Assintótico para fornecer uma estimativa do  $CN_{\infty}$ . No entanto, para o período de cobertura completa a estimativa do  $CN_{\infty}$  é uma extrapolação do valor do CN de referência, a qual está além dos limites dos dados observados, os quais não apresentam uma clara demonstração de um valor de equilíbrio. Contudo, a equação do comportamento Padrão parece representar bem a tendência dos dados. Os resultados analíticos obtidos como o método Assintótico para os comportamentos Complacente e Padrão são consistentes com as estimativas gráficas apresentadas na Tabela 4.26.

Os resultados analíticos obtidos com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados estão apresentados na Tabela 4.27. O CN de referência e as medidas estatísticas usadas para avaliar o desempenho dos métodos de calibração são apresentados na Tabela 4.28, com exceção dos períodos que apresentaram comportamento Complacente.

Tabela 4.26. Estimativas gráficas para o CN de referência.

<b>Bacia</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Comportamento CN-P</b>	<b>Estimativa gráfica do CN</b>
CC298	Parcial	Padrão	$CN_{\infty} \approx 70$ para $P \geq 50$ mm
	Completa	Complacente	$CN_{\infty}$ indeterminado, $\leq 50$
CC299	Parcial	Padrão	$CN_{\infty} \approx 81$ para $P \geq 10$ mm
	Completa	Complacente	$CN_{\infty}$ indeterminado, $\leq 50$



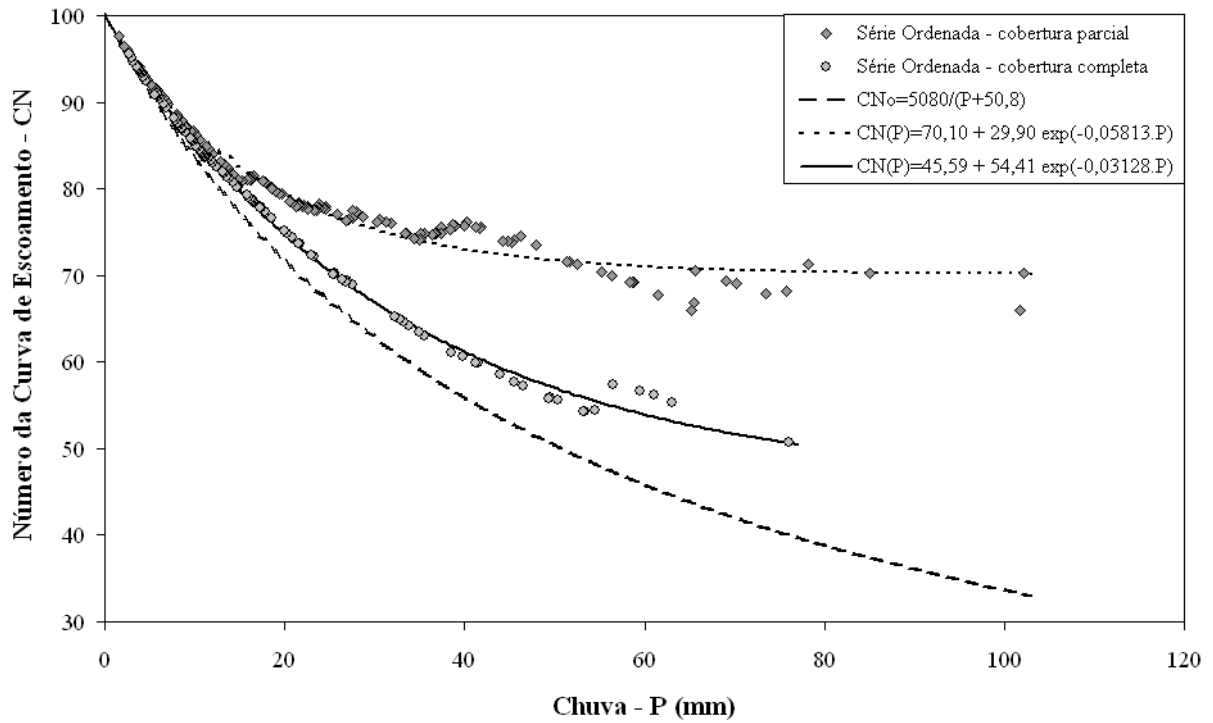


Figura 4.13. Variabilidade do CN com a chuva total para a bacia CC298 mostrando comportamento Padrão para cobertura parcial e comportamento Complacente para cobertura completa.

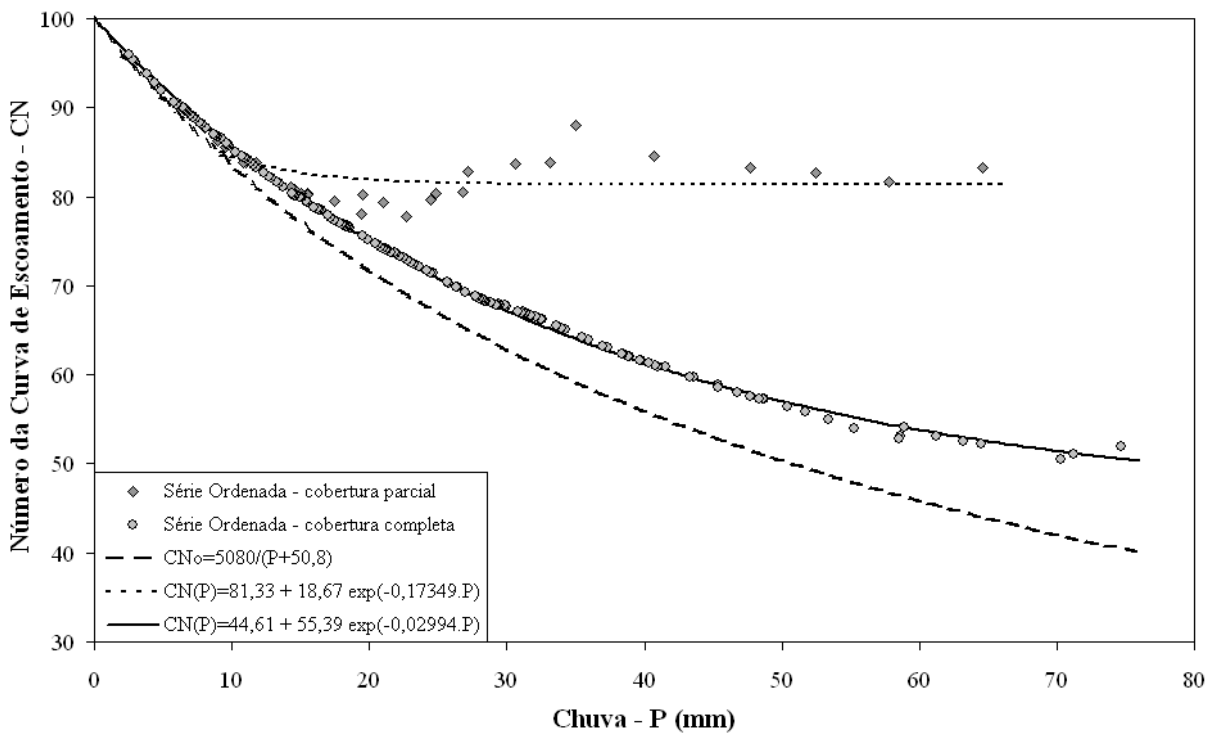


Figura 4.14. Variabilidade do CN com a chuva total para a bacia CC299 mostrando comportamento Padrão para cobertura parcial e comportamento Complacente para cobertura completa.

Tabela 4.27. CN calibrado com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados.

Bacia <sup>1</sup>	N	Assintótico						Mínimos Quadrados		
		CN <sub>∞</sub>	k	P <sub>90%</sub>	STB	SE	EF	CN	SE	EF
		---	mm <sup>-1</sup>	mm	%	---	---	---	mm	---
CC298	258	66,70	0,06012	51,6	95,5	0,87	0,990	65,43	3,78	0,207
CC298P	139	70,10	0,05813	58,4	96,7	1,27	0,974	69,14	4,96	0,163
CC298C	119	45,59	0,03128	45,5	75,9	0,66	0,997	43,61	0,46	-0,202
CC299	206	59,61	0,04880	46,8	89,8	2,69	0,926	59,80	3,22	0,002
CC299P	32	81,33	0,17349	47,7	100,0	2,40	0,532	82,09	3,85	0,725
CC299C	174	44,61	0,02994	46,8	75,4	0,35	0,999	44,21	0,41	-0,437

<sup>1</sup> As letras P e C após o código/nome da bacia significa cobertura parcial e cobertura completa, respectivamente.

CN<sub>∞</sub> e k: parâmetros de ajuste dos modelos Assintótico Padrão e Violento; P<sub>90%</sub>: valor da chuva associado ao quantil 90%;

STB: estabilidade; SE: erro padrão; EF: índice de eficiência.

Tabela 4.28. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias cultivadas com cana-de-açúcar.

BACIA	Assintótico					Mínimos Quadrados					CN
	Ia	N	EF	SE	EM	Ia	N	EF	SE	EM	
	mm	---	---	mm	mm	mm	---	---	mm	mm	
CC298	25,4	91	0,967	1,17	-0,14	26,8	83	0,937	1,66	-0,58	67
CC298P	21,7	72	0,956	1,42	-0,24	22,7	66	0,953	1,50	-0,62	70
CC298C	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	45
CC299	34,4	42	0,420	4,79	-0,93	34,1	43	0,429	4,70	-0,86	60
CC299P	11,7	23	0,954	1,74	-0,69	11,1	24	0,968	1,43	-0,30	82
CC299C	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	45

Ia = 0,2.S = abstração inicial; N = número de eventos usados na verificação com P > Ia; EF = índice de eficiência;

SE = erro padrão; EM = erro médio; CN = valor do parâmetro CN sugerido como referência para projetos.

A Figura 4.15 mostra os resultados obtidos para o CN de referência para cana-de-açúcar na forma gráfica, incluindo o CN para a parcela CC201 cujo uso é solo nu sem aração. Como pode ser observado, existe grande redução no valor do parâmetro CN em função da cobertura do solo, ou seja, 44 unidades de CN da condição de solo nu sem aração para a condição de cobertura completa pelo dossel. Uma noção da cobertura e de seu progresso pode ser vista na Figura 4.16. A foto da esquerda apresenta a cana-de-açúcar com aproximadamente quatro meses de crescimento, enquanto que na foto da direita ela tem aproximadamente seis meses. Com quatro meses não há folhas mortas ou secas nos troncos inferiores da cana-de-açúcar ou mesmo sobre a superfície do solo, mas com seis meses isto pode ser visto. A cobertura é bastante densa com pouca ou nenhuma superfície do solo exposta a chuva.

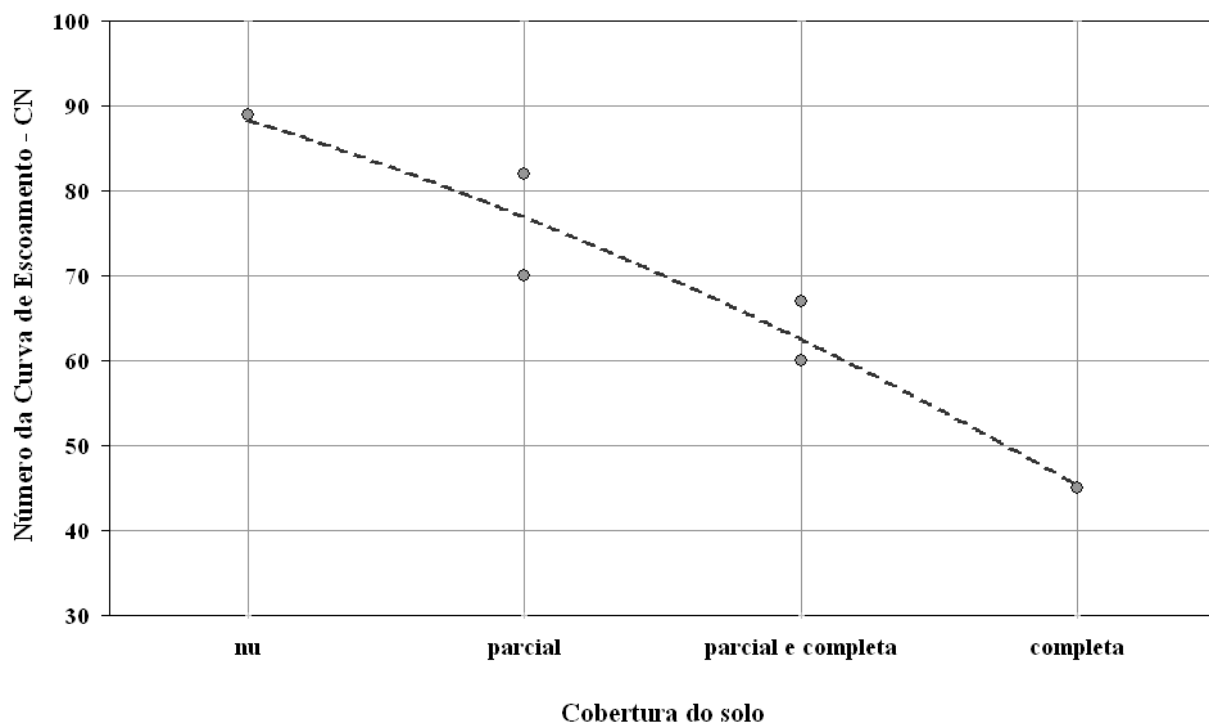


Figura 4.15. CN de referência para três condições de cobertura e três diferentes bacias incluindo o CN de referência para a combinação de duas condições de cobertura.



Figura 4.16. Cana-de-açúcar com diferentes idades: Na foto da esquerda as plantas têm aproximadamente 4 meses e na da direita cerca de seis meses. Local: Rodovia SP-127, aproximadamente 20 km do município de Piracicaba, SP.

A cobertura densa apresentada pela cultura da cana-de-açúcar após os sete meses de idade proporciona complexos níveis de interceptação pelo dossel e produz folhas mortas formando a liteira. O resultado dessa combinação é a redução dos impactos das gotas de chuva sobre o solo devido à absorção da energia cinética da chuva pelo dossel e pela liteira, que juntamente com as bases da planta melhoram as condições de retenção superficial e infiltrabilidade. Muito desse impacto é mantido após a colheita, quando o resíduo orgânico é mantido sem queimar na superfície do solo, enquanto as raízes são mantidas para brotar. Isto fornece uma proteção contínua para a superfície do solo e melhora a infiltração, reduzindo o escoamento superficial direto e contribuindo para valores reduzidos do parâmetro CN. Como resultado, o comportamento Complacente foi observado nos experimentos para os períodos de cobertura completa e para os períodos em que a cana foi deixada para brotar com resíduos na superfície. Esses períodos apresentam condições de baixa resposta hidrológica.

Além disso, existe provavelmente uma perspectiva de que essas condições favoreçam a atividade biológica do solo e atividade de pequenos animais, conduzindo a escoamentos preferenciais via macroporos produzidos por minhocas, insetos e raízes decompostas. Tais efeitos são comuns em solos profundos, protegidos e ricos em matéria orgânica (e.g., BOHLEN et al, 1995; Shipitalo et al, 2000). Isso pode ser a explicação do menor valor para o CN de referência obtido para cobertura parcial na bacia CC298P (CN=70) do que na bacia CC299P (CN=82), pois o uso anterior da bacia CC298P era cana-de-açúcar sob mesmo tratamento da bacia CC298P. Em situações similares, estudos hidrológicos em florestas de regiões úmidas atribui essa característica particular a atividade biológica tal como cavidades formadas por raízes e pequenos animais e aos efeitos da microbiologia do solo (e.g., NOCUCHI et al., 1999), como também a interceptação e ao escoamento através do tronco.

Essa noção de similaridade com bacias sob florestas é suportada pelo ajuste linear aos períodos de comportamento Complacente apresentado na Tabela 4.29. O escoamento superficial direto em torno de 0,8 por cento da chuva é consistente com as observações de Springer e Hawkins (2005) para 13 bacias sob floresta da região oeste dos Estados Unidos da América, que encontram valores variando de 0,1 a 2,1 por cento da chuva.

Tabela 4.29. Ajuste da função linear  $Q = C \cdot P$  aos dados de cobertura completa.

Bacia	Cobertura	Comportamento CN-P	C (mm/mm)	SE (mm)	R <sup>2</sup>
CC298	Completa	Complacente	0,0081	0,42	0,197
CC299	Completa	Complacente	0,0086	0,34	0,345

SE: erro padrão; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação

#### 4.4.6. CN para outros usos

Aqui são apresentados resultados da calibração do CN para algumas parcelas/bacias hidrográficas com usos particulares tal como Caatinga, Cactos (Palma) e Eucalipto com Mata Ciliar nativa. Informações sobre as bacias e o número de eventos usados na calibração são apresentadas na Tabela 4.30.

Tabela 4.30. Local, nome e algumas características das bacias com Caatinga, Cactos e Eucalipto com Mata Ciliar.

##### CN para outros usos

Local	GHS	Bacia	Área m <sup>2</sup>	Uso	COMP	N
Sumé, PB	D	SUM01	0,62 x 10 <sup>4</sup>	Caatinga nativa	P	65
		SUM02	1,07 x 10 <sup>4</sup>	Caatinga nativa	P	65
		SUP05	100	Caatinga nativa	P	78
		SUP09	100	Caatinga renascida	P	43
		SUP06	100	Cactos (Palma)	P	168
		SUP07	100	Cactos (Palma)	V	159/82*
		Bofete, SP	A	WBOF	53,23 x 10 <sup>4</sup>	Eucalipto (93%), mata ciliar nativa (2%) e estrada de terra (5%)
Aracruz, ES	B #	WARA	386,17 x 10 <sup>4</sup>	Eucalipto (66,0%), mata ciliar nativa (29,9%) e estrada de terra (4,1%)	P	19

GHS = grupo hidrológico do solo de acordo com a classificação hidrológica proposta neste trabalho.

COMP = Comportamento CN-P; P = Padrão; C = Complacente; V = Violento.

N = número de eventos disponíveis com escoamento superficial direto maior do que zero usados para calibrar o CN.

\* 159 eventos com o método dos Mínimos Quadrados e 82 eventos com o método Assintótico Violento.

# Foi considerada como pertencente ao grupo hidrológico B devido aos demais grupos representarem menos do que 20 % da área total da bacia, ou seja, 11,8 % sobre o grupo hidrológico C e 5,1 % sobre o grupo hidrológico D.

Os resultados da calibração do CN com os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados estão apresentados na Tabela 4.31. Para a calibração nenhuma restrição foi feita quanto ao valor mínimo da chuva, com exceção da bacia SUP07 que apresentou comportamento Violento para

chuvas maiores do que 18 mm, então apenas eventos da série ordenada com  $P > 18$  mm foram considerados para o ajuste do modelo violento, como pode ser observado na Figura 4.17. O CN de referência e as medidas estatísticas usadas para avaliar o desempenho dos métodos de calibração são apresentados na Tabela 4.32, com exceção da bacia WBOF que apresentou comportamento Complacente e por esse motivo apenas o valor do CN de referência obtido por extrapolação com o modelo do método Assintótico Padrão é apresentado, conforme mostra a Figura 4.18.

Tabela 4.31. Resultados da calibração do CN para bacias com Caatinga, Cactos e Eucalipto com Mata Ciliar.

Bacia	Assintótico						Mínimos Quadrados		
	CN <sub>∞</sub>	k	P <sub>90%</sub>	STB	SE	EF	CN	SE	EF
	---	mm <sup>-1</sup>	mm	%	---	---	---	mm	---
SUM01	49,65	0,04048	68,2	93,7	1,35	0,983	52,26	1,52	0,938
SUM02	57,15	0,05461	70,2	97,8	2,45	0,912	57,67	5,28	0,511
SUP05	55,42	0,05013	67,2	96,6	2,49	0,927	55,59	4,63	0,706
SUP09	63,07	0,06257	55,2	96,8	1,86	0,901	65,24	4,63	-0,823
SUP06	89,32	0,25479	43,8	100,0	1,69	0,474	87,90	6,25	0,751
SUP07	88,86	0,11621	52,4	99,8	1,91	0,751	84,89	6,48	0,746
WBOF	36,62	0,02392	44,8	65,8	0,51	0,998	43,18	0,28	0,176
WARA	34,51	0,01870	123,4	89,3	0,69	0,994	35,85	3,01	0,916

CN<sub>∞</sub> e k: parâmetros de ajuste dos modelos Assintótico Padrão e Violento; P<sub>90%</sub>: valor da chuva associado ao quantil 90%; STB: estabilidade; SE: erro padrão; EF: índice de eficiência.

Tabela 4.32. Desempenho dos métodos de calibração e CN de referência para bacias com Caatinga, Cactos e Eucalipto com Mata Ciliar.

BACIA	Assintótico					Mínimos Quadrados					CN
	Ia	N	EF	SE	EM	Ia	N	EF	SE	EM	
	mm	---	---	mm	mm	mm	---	---	mm	mm	
SUM01	51,5	12	0,951	2,89	-0,83	46,4	14	0,993	1,02	-0,16	
SUM02	38,1	25	0,791	2,33	-0,59	37,3	26	0,804	5,07	-0,36	56
SUP05	40,9	25	0,911	4,22	-0,79	40,6	26	0,915	4,04	-0,75	
SUP09	29,7	24	0,954	0,87	0,24	27,1	25	0,829	1,64	0,81	63
SUP06	6,1	140	0,923	3,69	-0,11	7,0	136	0,916	3,89	-1,10	89
SUP07	6,4	139	0,920	3,81	1,79	9,0	121	0,935	3,61	-0,80	
WBOF	87,9	--	--	--	--	66,8	--	--	--	--	37
WARA	96,4	5	0,950	4,25	-3,53	90,9	5	0,969	3,35	-1,90	36

Ia = 0,2.S = abstração inicial; N = número de eventos usados na verificação com  $P > Ia$ ; EF = índice de eficiência; SE = erro padrão; EM = erro médio; CN = valor do parâmetro CN sugerido como referência para projetos.

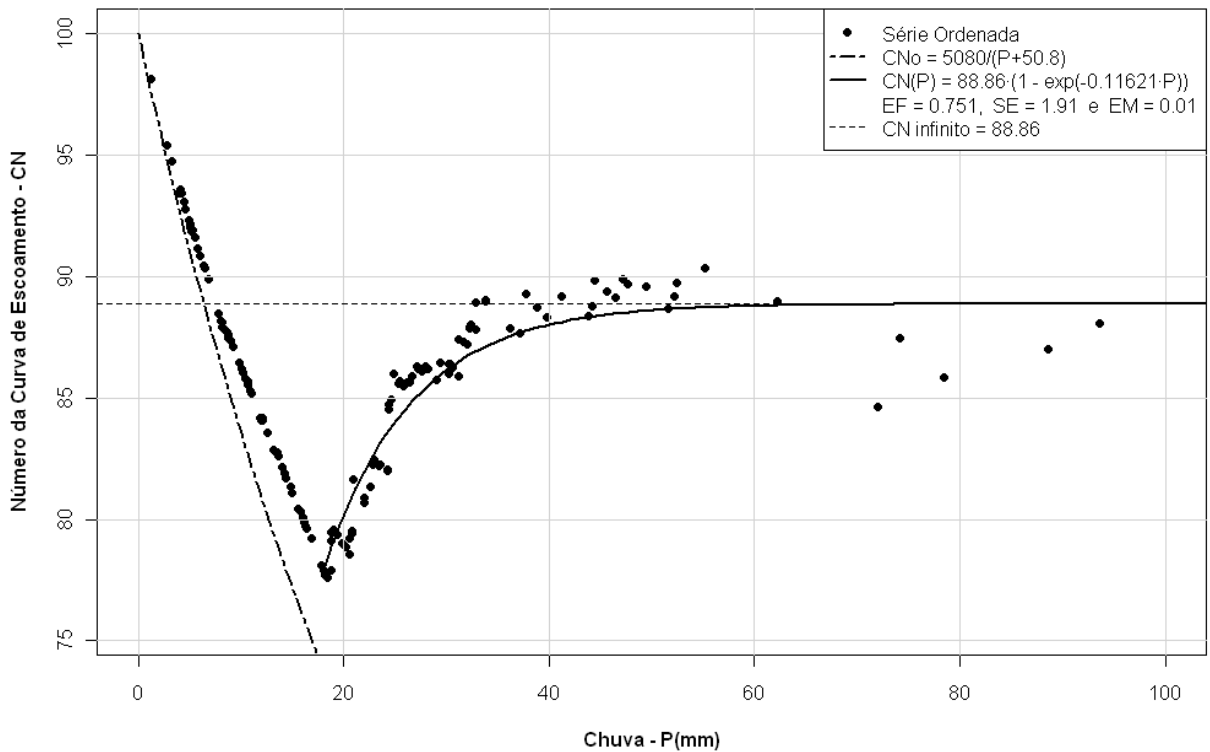


Figura 4.17. Ajuste do modelo Assintótico Violento aos dados da bacia SUP07 mostrando comportamento Violento.

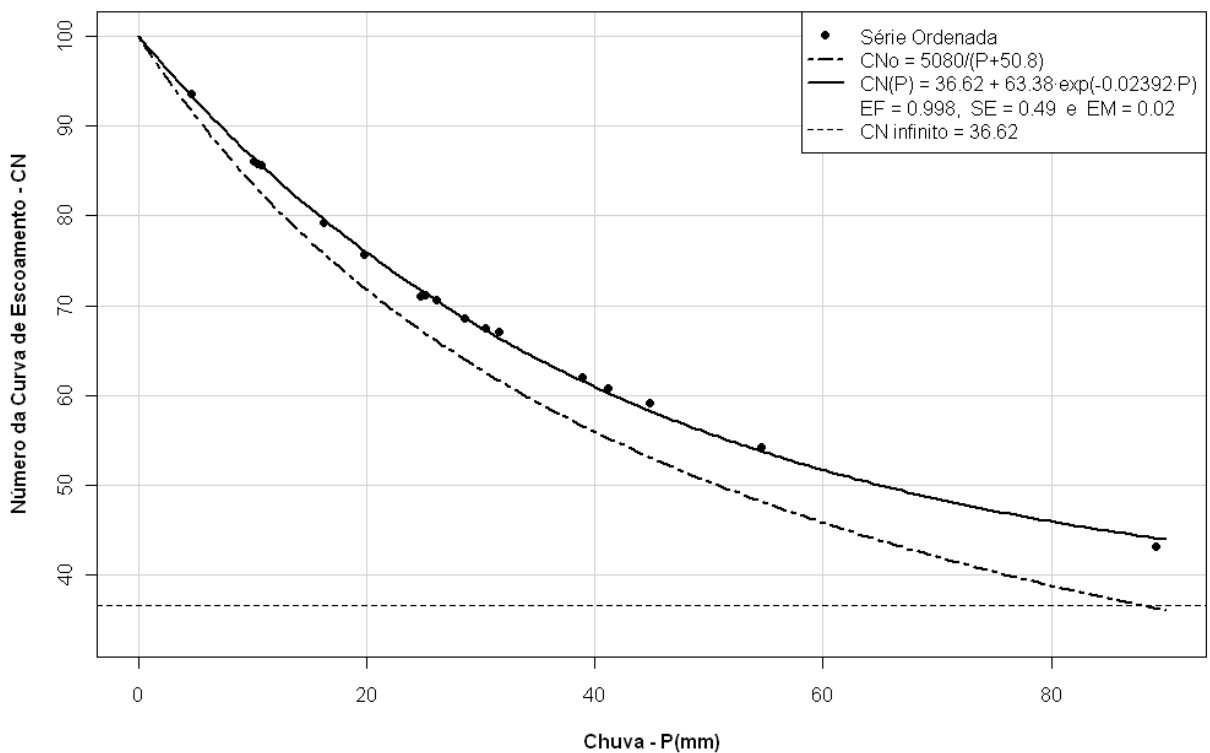


Figura 4.18. Ajuste do modelo Assintótico Padrão aos dados da bacia WBOF mostrando comportamento Complacente.

Caatinga é uma vegetação típica do Sertão brasileiro com espécies adaptadas as condições de aridez (xerófilas). O CN de referência obtido para a Caatinga renascida foi 63 e para a Caatinga nativa foi 56. Esses resultados indicam que embora o solo esteja protegido da força da chuva nos dois casos, as condições de retenção e infiltração da água no solo são melhores sob a Caatinga nativa. Similarmente ao caso da cana-de-açúcar apresentado no item 4.4.5, a Caatinga nativa pode desenvolver ao longo de sua existência condições que favoreçam a atividade biológica do solo e atividades de pequenos animais, as quais melhoram a agregação e a aeração do solo via macroporos, conduzindo assim a escoamentos preferenciais. No período úmido a Caatinga apresenta uma densa cobertura pelo dossel e no período seco deixa suas folhas na superfície do solo.

A Palma é uma espécie de cactos usada em geral para alimentação de gado na região semi-árida do Brasil. Como pode ser observado na Figura 4.19, este tipo de vegetação não protege a maior parte do solo contra o impacto das gotas de chuva e, além disso, promove um escoamento concentrado próximo ao tronco devido à interceptação da chuva pelo dossel. Por esse motivo o CN de referência obtido para este cultivo foi o mesmo obtido para solo nu (bacia SUP08) e para solo desmatado (bacias SUM03, SUM04, SUP01 e SUP04) desta mesma unidade experimental, conforme apresentado nos itens 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente.

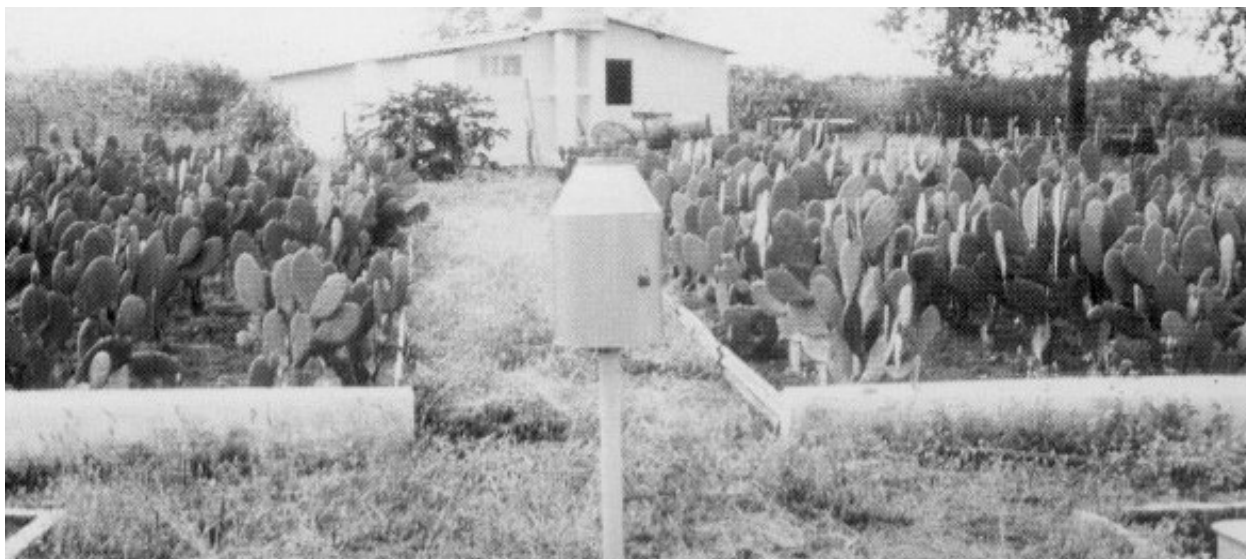


Figura 4.19. Palma cultivada nas bacias SUP06 e SUP07. Fonte: Srinivasan e Galvão (2003).



O CN de referência para bacias cultivadas com Eucalipto foi praticamente o mesmo, independente do grupo hidrológico de solo, ou seja, A para a bacia WBOF e B para a bacia WARA. Isto pode ser resultado da cobertura florestal que proporcionou as duas bacias a comum baixa resposta hidrológica e comportamento Complacente, no caso da WARA para eventos de chuva menores do que 163 mm, conforme mostra a Figura 4.20. Isto significa que se o evento extremo de chuva cuja precipitação média sobre a bacia foi de 266,5 mm em 9 horas e 30 minutos com início no dia 16/03/2004 às 15h40 min. não tivesse ocorrido, a bacia seria classificada como Complacente e o CN só poderia ser obtido por extrapolação. Essa suposição foi feita e com o ajuste assintótico sem o evento extremo obteve-se um CN igual a 34, próximo do valor obtido sem excluir o grande evento (CN=34,5). Isso mostra que o modelo Assintótico é mesmo adequado para extrapolar o CN de referência, se o comportamento for mesmo Padrão para grandes eventos não contidos na amostra de dados. No entanto, o Método do CN só será adequado para as grandes chuvas não contidas na amostra de dados, pois a distribuição do escoamento superficial direto é paralela a distribuição da chuva, como pode ser observado na Figura 4.21 sobre papel probabilístico log-normal, com exceção, é claro, do evento extremo.

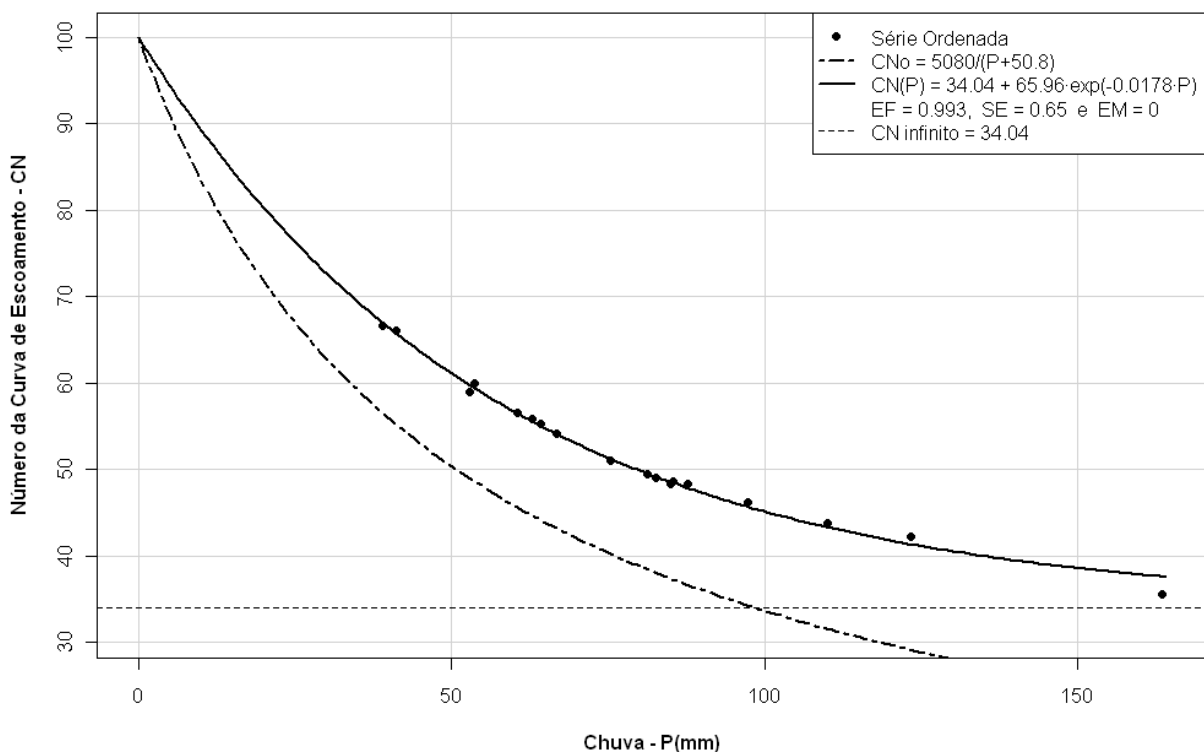


Figura 4.20. Ajuste do modelo Assintótico Padrão aos dados da bacia WARA sem o evento do dia 16/03/2004, mostrando comportamento Complacente.

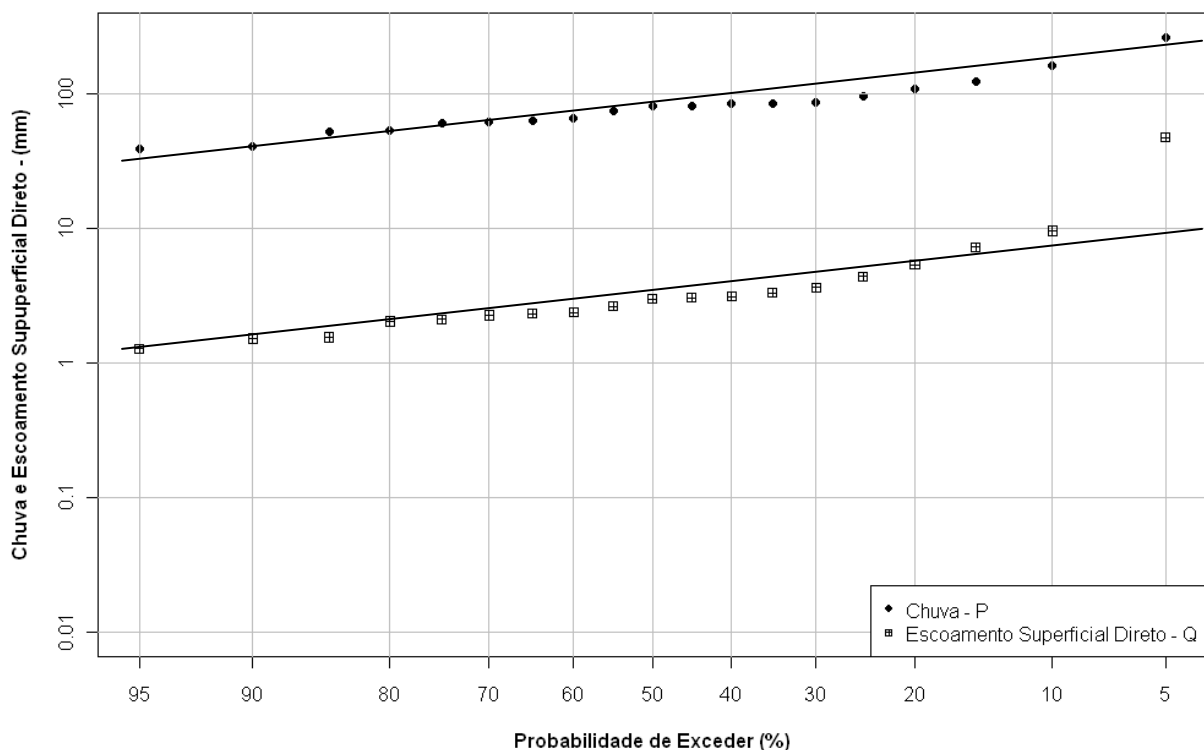


Figura 4.21. Distribuição de frequência da chuva e do escoamento superficial direto observado na bacia WARA mostrando relação proporcional entre elas. As linhas sobre as distribuições foram traçadas manualmente e não representam ajuste matemático da distribuição log-normal.

Como pode ser observado na Figura 4.21, existe uma relação proporcional entre as distribuições de frequência da chuva e do escoamento superficial, com exceção do evento do dia 16/03/2004 que se distancia da tendência central. Isso confirma o comportamento Complacente da bacia para eventos menores do que 160 mm, sendo então a amostra de dados para  $P < 160$  mm melhor representada pela relação  $Q = C \cdot P$  e para eventos maiores seguem o modelo do Método do CN.

Em geral, o comportamento Complacente é característico de bacias com baixa resposta hidrológica e tem sido observado em bacias florestadas com solos relativamente permeáveis (e.g. HAWKINS, 1973; HAWKINS, 1979; SPRING e HAWKINS, 2005). Neste trabalho ele foi observado nas bacias com Eucaliptos (WBOF e WARA), na cultura da cana-de-açúcar sob condição de cobertura completa (CC298 e CC299) e no cultivo de soja e trigo em rotação no sistema de plantio direto. Isso significa que a cobertura e o ambiente propício para atividade biológica do solo parecem ser fatores que levam a tal comportamento.

#### 4.4.7. Síntese dos valores de referência estabelecidos para o parâmetro CN

Nos itens 4.4.1 a 4.4.6 foram apresentados e discutidos os resultados do estudo desenvolvido neste trabalho para definir valores de referência para o parâmetro CN para alguns locais do Brasil. Estes valores foram definidos após análise de séries hidrológicas totais e parciais, de chuva e escoamento superficial direto, observadas em pequenas bacias e parcelas experimentais. Os resultados estão sintetizados nas Tabelas 4.33 a 4.38 e podem ser usados em condições similares as que foram obtidos.

Para bacias com área maior ou igual a 5 km<sup>2</sup>, em geral o CN usado na estimativa da chuva excedente é um CN médio, obtido por uma composição ponderada. Por esse motivo, dificilmente são usadas bacias com área superior a 2 km<sup>2</sup> para se determinar o CN de referência. Portanto, o uso de valores de referência fica em geral limitado a áreas menores do que a da bacia, as quais são definidas pelas escalas dos mapas de solo e de uso da terra, ou seja, quanto maior for o fator de escala desses mapas, menor será a área de um complexo hidrológico.

Assim, os valores de referência sugeridos podem ser considerados válidos para aplicação em bacias hidrográficas com áreas significativamente maiores do que as das bacias que deram origem aos valores propostos. No caso da aplicação do Método do CN em bacias maiores do que 250 km<sup>2</sup>, Ponce e Hawkins (1996) recomendam subdividi-las.

Tabela 4.33. CN para solo nu

Local	Área (m <sup>2</sup> )	GHS	Manejo	CN
Campinas, SP	100	A	sem aração	88
Mococa, SP	100	B	sem aração	88
Sumé, PB	100	D	sem aração	89
Planaltina, DF	77	B	uma aração e gradagem no ano	78
Lajes, SC	77,35	C	uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano	87

Tabela 4.34. CN para solo sem cultivo.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	GHS	Manejo	CN
Campinas, SP	100	A	250 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	88
	100	A	500 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	87
	100	A	1000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	87
	100	A	1500 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	86
	100	A	2000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	85
	100	A	4000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	77
	100	A	8000 kg/ha de restos culturais de milho na superfície do solo	65
Sumé, PB	100 a 5200	D	Desmatada: a vegetação era cortada quando sua altura atingia 5 cm	89
	100	D	Vegetação rasteira com cobertura morta	74

Tabela 4.35. CN para a cultura de milho.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	GHS	Manejo	CN
Campinas, SP	100	A	restos culturais queimados e plantio morro abaixo	67
	100	A	restos culturais incorporados e plantio morro abaixo	63
	100	A	restos culturais incorporados e plantio em contorno	61
	100	A	restos culturais na superfície e plantio morro abaixo	54
	1875	A	preparo convencional e cultivos mecânicos	56
	1875	A	plantio direto	55
	1875	A	preparo com grade pesada e plantio morro abaixo	61
	1875	A	plantio direto morro abaixo	53
Mococa, SP	100	B	restos culturais incorporados e plantio morro abaixo	78
	100	B	restos culturais na superfície e plantio morro abaixo	53

Tabela 4.36. CN para a cultura de soja e trigo em rotação.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	GHS	Manejo	CN
Campinas, SP	100	A	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos incorporados e plantio morro abaixo	71
	100	A	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos queimados e plantio morro abaixo	75
	100	A	restos na superfície e plantio direto morro abaixo/restos na superfície e plantio direto morro abaixo <sup>1/</sup>	48
	100	A	restos incorporados e plantio morro abaixo/restos na superfície e plantio morro abaixo	66
Lajes, SC	77,35	C	Cultivo mínimo: solo submetido a uma escarificação e uma gradagem, duas vezes ao ano	73
	77,35	C	Preparo convencional: solo submetido a uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano	77
	77,35	C	Semeadura direta: semeadura sem mobilização prévia do solo	58

1/ Comportamento Complacente; maior chuva contida na amostra igual a 130,8 mm.

Tabela 4.37. CN para a cultura de cana-de-açúcar.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	GHS	Manejo	CN
Campinas, SP	100	A	cobertura parcial	76
	100	A	cobertura completa <sup>1/</sup>	45

1/ Comportamento Complacente; maior chuva contida na amostra igual a 76,1 mm.

Tabela 4.38. CN para outros usos.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	GHS	Manejo	CN
Sumé, PB	100 a 1,07x10 <sup>4</sup>	D	Caatinga nativa	56
	100	D	Caatinga renascida	63
	100	D	Cactos (Palma)	89
Bofete, SP	53,23x10 <sup>4</sup>	A	Eucalipto (93%), mata ciliar nativa (2%) e estrada de terra (5%) <sup>1/</sup>	37
Aracruz, ES	386,17x10 <sup>4</sup>	B	Eucalipto (66,0%), mata ciliar nativa (29,9%) e estrada de terra (4,1%) <sup>2/</sup>	36

1/ Comportamento Complacente; maior chuva contida na amostra igual a 89,2 mm

2/ Comportamento Complacente para chuvas menores do que 160 mm; maior chuva contida na amostra igual a 266,5 mm.



## 5. CONCLUSÕES

O Método do Número da Curva de Escoamento (“Runoff Curve Number Method”) ou simplesmente Método do CN é mundialmente usado para estimativa da chuva excedente a partir de chuvas, principalmente para bacias não monitoradas. As maiores dificuldades de aplicação do método fora do país de origem estão relacionadas com a definição dos grupos hidrológicos de solo e a falta de valores locais de referência para o parâmetro CN. Portanto, neste estudo foi proposta uma classificação hidrológica de solos alternativa para uso com o Método do CN, a qual foi aplicada a 58 perfis de solos brasileiros e os resultados foram comparados com os da classificação hidrológica de solos revisada do NRCS. Também foram aplicados e comparados seis métodos de calibração do CN: (a) “National Engineering Handbook”; (b) Mínimos Quadrados; (c) Curva de Frequência; (d)  $P/S > 0,46$ ; (e) Assintótico; (f) Frequência Log-normal. Além dessa análise, valores de referência para o parâmetro CN foram estabelecidos.

As análises realizadas com a classificação hidrológica proposta indicaram que ela é viável e tecnicamente possível devido a: (1) as propriedades usadas estarem disponíveis nos boletins de levantamento e na classificação pedológica dos solos; (2) as propriedades usadas influenciarem indiretamente no comportamento hidrológico dos solos; (3) os critérios serem claros e de fácil entendimento, ou seja, não exigem conhecimentos avançados sobre pedologia. Além disso, os resultados mostraram que a classificação hidrológica proposta é mais conservadora do que a classificação hidrológica do NRCS, isto é, quando se desvia da classificação do NRCS tende para grupos hidrológicos de solos de maior potencial de escoamento superficial.

Embora os bons resultados obtidos com a classificação hidrológica proposta suportem sua indicação para uso no Brasil, ela não está fechada e ajustes para melhorar sua aplicação poderão ser realizados como, por exemplo, a inclusão de atributos químicos e mineralógicos nos critérios de classificação. No entanto, para o propósito de aplicações práticas, estas melhorias se viabilizarão apenas quando as informações necessárias estiverem disponíveis nos levantamentos pedológicos e na classificação dos solos. Portanto, pode-se concluir que a classificação hidrológica proposta é adequada à realidade do Brasil.

Os resultados da análise dos métodos de calibração do parâmetro CN mostraram que os valores do CN devem apresentar uma tendência assintótica para as maiores chuvas da amostra, usando séries ordenadas, de acordo com os comportamentos Padrão e Violento, para que o Método do CN seja adequado para a bacia em análise. Para bacias com estes tipos de resposta os métodos Assintótico, Mínimos Quadrados e  $P/S > 0,46$  foram os que conduziram o Método do CN aos maiores índices de eficiência para as análises realizadas. Em geral, para as bacias analisadas os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados foram os mais estáveis e determinam valores para o CN que podem ser considerados equivalentes para bacias de comportamento Padrão e Violento e, por esse motivo, são os métodos recomendados para calibrar o parâmetro CN usando séries estendidas. Além disso, o método Assintótico é o único que reconhece os diferentes tipos de resposta da bacia com relação ao comportamento CN-P, podendo também ser aplicado a bacias de comportamento Complacente para obter o CN de referência por extrapolação. Esta extrapolação deixa implícito comportamento Padrão para chuvas maiores que as contidas na amostra. É importante ressaltar que essa análise comparativa foi realizada com séries estendidas, isto é, série total ou parcial, sendo, portanto, recomendado um novo estudo no caso de serem usadas séries anuais.

Com base nos resultados da análise comparativa dos métodos de calibração do CN, os métodos Assintótico e Mínimos Quadrados foram adotados para o estudo de calibração e para o estabelecimento de valores de referência para o parâmetro CN, para alguns locais do Brasil. Estes valores de referência encontram-se sintetizados nas Tabelas 4.33 a 4.38 do item 4.4.7 e podem ser usados em condições similares as que foram obtidos.



Além disso, observou-se no estudo de calibração que para a condição de solo nu sem aração o valor de referência para o CN é cerca de 90, independentemente do tipo ou grupo hidrológico de solo. Esse resultado pode ter sido consequência do selamento superficial, uma vez que o solo estava desprotegido da ação da chuva. Essa hipótese foi suportada pelos resultados obtidos com os dados do IAC, referentes às bacias sem cultivo cobertas com resíduos culturais de milho. Estes resultados mostraram uma redução de 23 unidades no parâmetro CN da condição de solo nu sem aração para a condição de aproximadamente 90 % da superfície do solo coberta com resíduos culturais de milho. Isso sugere que a suscetibilidade da superfície do solo a ação da chuva pode ser mais importante que o grupo hidrológico de solo para a condição de solo nu sem aração.

O comportamento Complacente foi observado em algumas bacias com o mesmo tipo de solo e uso da terra, mas sob diferentes condições de cobertura do solo devido ao manejo aplicado ou ao estágio de desenvolvimento do dossel. Este foi o caso da bacia CC252 plantada com soja e trigo em rotação em sistema de plantio direto, das bacias EC02 e EC03 cobertas artificialmente com sombrite e das bacias CC298 e CC299 plantadas com cana-de-açúcar sob condição de cobertura completa. Assim como para as bacias citadas, as bacias WBOF e WARA também apresentaram comportamento Complacente, no caso da WARA, para eventos de chuva menores do que 100 mm. Estas bacias também possuem solos permeáveis e uma significativa proteção da superfície do solo devido à cobertura de eucalipto e mata ciliar nativa. Esses resultados sugerem que a cobertura e/ou o ambiente propício para atividade biológica do solo podem ser os fatores responsáveis pelo comportamento Complacente apresentado.

Em se tratando de bacias com comportamento Complacente, o Método do CN não é adequado para representar a amostra de dados. Nestes casos, o modelo linear  $Q = C \cdot P$  proposto por Hawkins (1979) pode ser usado para valores de chuva menores que a abstração inicial, estimada com o CN de referência obtido por extrapolação com o método Assintótico. Para chuvas maiores, se for suposto o comportamento Padrão, o Método do CN pode ser usado para estimar a chuva excedente com o CN de referência. Infelizmente não existe ainda uma forma de identificar se uma bacia apresenta ou não comportamento Complacente, a não ser analisando dados observados de chuva e vazão.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p. 136-141, 2002.
- ALENCAR, D.B.S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v.26, n.1, p.103-112, jan./abr. 2006.
- AMARAL, A. J. **Fator cobertura e manejo da equação universal de perda de solo para soja e trigo em um cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade Estadual de Santa Catarina, Lajes-SC, 2006.
- AMORIM, R. F. C. **Estimativas de parâmetros hidrológicos de uma pequena bacia de drenagem na região central do Estado de São Paulo**. 1995. 132p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciência Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 1995.
- ANDREWS, R. G. **The use of relative infiltration indices in computing runoff**. Soil Conservation Service, Forth Worth, Texas, 1954, 6 p. (não publicado).
- ARACRUZ. **Projeto de monitoramento de microbacia: relatório anual da atividades realizadas em 1994**. Aracruz-ES: Aracruz Celulose e Papel, 1995. 128p.

- AVANZI, C. J. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos tabuleiros costeiros**. 2005. 68p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2005.
- BARRETO NETO, A.A. **Modelagem dinâmica de processos ambientais**. 2004. 123p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2004.
- BERNARDES, R. S. **Condutividade Hidráulica de três solos da região Norte Fluminense**. 2005. 69 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 2005.
- BERTONI, J. **Espaçamento de terraços para os solos do Estado**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1978. 4 p.
- BOHLEN, P. J., EDWARDS, W. M.; EDWARDS, C. A. Earthworm community structure and diversity in Experimental agricultural watersheds in Northeastern Ohio. **Plant and Soil**, v.170, n.1, p. 233-239.
- BONDELID, T.R., MCCUEN, R. H.; JACKSON, T. J. Sensitivity of SCS models to Curve Number variation. **Water Resources Bulletin**, v.18, n.1, p.111-116, February 1982.
- BRADY, N.C.; WEIL, R. R. **Elements of the nature and properties of soils**. New Jersey, Prentice Hall, 2000. 573p.
- BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J. Green-Ampt Infiltration Model Parameters for Hydrologic Classification of Soils. In: Specialty Conference on Advances in Irrigation and Drainage: Surviving external pressures, July, 20-22, 1983, Jackson, Wyoming, USA. **Proceedings ... ASCE/ASAE**, 1983, p. 226-233.
- BRASIL, Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas e reconhecimento de solos. **Levantamento e reconhecimento de solos do Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas, 1960, 643p. (SNPA, Boletim, 12).
- CADIER, E.; FREITAS, B.J.; LEPRUN, J.C. **Bacia Experimental de Sumé: Instalação e primeiros resultados**. Recife: SUDENE, 1983. 87p. (Série Hidrologia n.º 16).

- CASTRO, O. M.; LOMBARDI NETO, F.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Sistemas convencionais e reduzidos de preparo do solo e as perdas por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, n.2, p.167-171, maio/ago. 1986.
- CAZIER, D.J. E HAWKINS, R. H. Regional application of the curve number method. In: Water Today and Tomorrow, 1984, Flagstaff, AZ, USA. **Proceedings of the Specialty Conference, Irrigation and Drainage Division, ASCE**. American Society of Civil Engineers, 1984. Abstract p. 710.
- CHAHINIAN, N.; MOUSSA, R.; ANDRIEUX, P.; VOLTZ, M. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. **Journal of Hydrology**, v. 306, p.191-214, 2005.
- CHEN, C-L. An evaluation of the mathematical and physical significance of the soil conservation serviced procedure for estimating runoff volume. **Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, 1981 at Mississippi State, Mississippi, U.S.A.** Edited by Vijay P. Singh. Department of Civil Engineering. Louisiana State University. Baton Rouge, Louisiana 70803, USA. Water Resources Publications, p. 387-418, 1982.
- CHEN, C-L. **Urban Storm Inlet Study, Soil-Cover-Moisture Complex: Analysis of Parametric Infiltration Models for Highway Side Slopes**. Federal Highway Administration Report, FHWA-RD-76-120, v.5, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. Singapore: McGraw-Hill, 1988. 572p.
- COOLEY, K. R. E LANE, L. J. Optimized runoff curve numbers for sugarcane and pineapple fields in Hawaii. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.35, n.3, p. 137-141, May/June, 1980.
- CORDEIRO, J. C. **Características Físico-Hídricas de Latossolos sob Vegetação de Cerrados do Brasil Central**. 1977. 122p. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1977.

- CRONSHEY, R. Discussion to “Antecedent Moisture Condition Probabilities”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n.2, p.296-298, 1983.
- CRUZ, J. C.; ALVARENGA, R. C.; NOVOTNY, E. H.; PEREIRA FILHO, I. A.; SANTANA, D. P.; PEREIRA, F. T. F.; HERNANI, L. C. Sistema Plantio Direto. In: Embrapa Milho e Sorgo. **Sistema de Produção 1 - Cultivo do Milho**. ISSN 1679-012. Versão Eletrônica - 2ª Edição Dez./2006. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/Cult>>. Acesso em: 13 de dezembro de 2009.
- DE MARIA, I. C. **Razão de perdas de solo para alguns sistemas de manejo da cultura de milho**. 1995. 93p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1995.
- DE MARIA, I. C.; LOMBARDI NETO, F. Razão de perdas de solo e fator C para sistemas de manejo da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.2 , p.263-270, 1997.
- DEDECEK, R. A. Coberturas permanentes do solo na erosão sob condições de cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.4, p.483-488, 1989.
- DER-SP - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **Projetos de Drenagem**. São Paulo, 2001. (DE 01/HID-002). Disponível em: <[www.der.sp.gov.br](http://www.der.sp.gov.br)>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2005.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 2.ª edição. Rio de Janeiro, 2005. 133p. (IPR. Publ., 715).
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. **Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos**, Rio de Janeiro, 1979. 83p. (Miscelânea, 1).
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ª Ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FREIRE, O. **Solos das regiões tropicais**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2006. 268p.
- GENOVEZ, A. M. **Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do Estado de São Paulo**. 1991, 241p. Tese (Livre Docência) -

- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1991.
- GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C.; LIMA, J.M.J.C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.2, p. 307-319, 2006.
- GRAY, D. D., KATZ, P. G.; MONSABERT, S. M.; COGO, N. P. Antecedent moisture condition probabilities. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v.108, n.2, p.107-114, June 1982.
- HAWKINS, R. H. Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n.2, p. 334-344, March/April 1993.
- HAWKINS, R. H. Discussion to “Antecedent Moisture Condition Probabilities”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n.2, p.298-299, 1983.
- HAWKINS, R. H. Discussion to “Infiltration formula based on SCS curve number”. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v. 104, n.4, p.464-467, 1978.
- HAWKINS, R. H. Improved prediction of storm runoff from mountain watersheds. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v. 99, n.4, p.519-523, 1973.
- HAWKINS, R. H. Infiltration and Curve Numbers: Some Pragmatic and Theoretic Relationships. In: Symposium of Watershed Management, 1980, Boise, Idaho, USA. **Proceedings ... American Society of Civil Engineering**, 1980. p. 925-937.
- HAWKINS, R. H. **Re: I invite you participate of one project as co-advisor or professor collaborator.** Mensagem pessoal recebida por: <adersonxt4@yahoo.com.br> em 13/04/2005.
- HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number from Partial Area Watersheds. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.105, n.1R4, December 1979.
- HAWKINS, R. H. The Importance of Accurate Curve Numbers in the Estimation of Storm Runoff. **Water Resources Bulletin**, v.11, n.5, p.887-891, October 1975.

- HAWKINS, R. H., HJELMFELT, A. T., E ZEVENBERGER, A. W. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.111, n.4, p. 330-340, 1985.
- HAWKINS, R. H.; JIANG, R.; WOODWARD, D. E.; HJELMFELT, A. T.; VAN MULLEM, J. E. Runoff Curve Number Method: Examination of the initial abstraction ratio. In: Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, 2, 2002, Las Vegas, NV. **Proceedings ...** U.S. Geological Survey Advisory Committee on Water Information, 2002. 12p. [1CD-ROM].
- HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; VAN MULLEM, J. A. **Curve Number Hydrology: State of the Practice**. Reston, VA: ASCE/EWRI, 2009. 106p.
- HILDEBERTO JÚNIOR, B. L.; HÉRBETE DAVI, H. R. C; FIGUEIREDO, E. E. Variação da Curva Número com a Escala e Uso do Solo na Bacia Representativa de Sumé. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14, 2001, Aracajú-SE. **Anais ...** ABRH, 2001. 19p. [1CD ROM].
- HJELMFELT, A. T. Empirical investigation of Curve Number Technique. **Journal of Hydraulics Division**, v.106, n.9, p. 1471-1476, 1980.
- HJELMFELT, A. T. Investigation of Curve Number Procedure. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.117, n.6, p. 725-737, 1991.
- HJELMFELT, A. T.; KRAMER, L. A.; BURWELL, R. E. Curve Numbers as Random Variables. Rainfall-Runoff Relationship. **Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, 1981 at Mississippi State, Mississippi, U.S.A.** Edited by Vijay P. Singh. Department of Civil Engineering. Louisiana State University. Baton Rouge, Louisiana 70803, USA. Water Resources Publications, p. 365-370, 1982.
- HJELMFELT, A.T.; WOODWARD, D.A.; CONAWAY, G; QUAN, Q.D.; VAN MULLEM, J.; HAWKINS, R. H. Curve Numbers, Recent Developments. In: IAHR Biennial Congress, 29, 2001, Beijing, China. **Proceedings ...** IAHR, 2001. 7p. Disponível em: <[http://www.iahr.org/e-library/beijing\\_proceedings/Theme\\_A/CURVE%20NUMBERS,%20RECENT%20DEVELOPMENTS.html](http://www.iahr.org/e-library/beijing_proceedings/Theme_A/CURVE%20NUMBERS,%20RECENT%20DEVELOPMENTS.html)>. Acesso em: 25/05/2006.



- JIANG, R. **Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio**. 2001. 120p. Thesis (Masters of Science with a major in Watershed Management) – School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, Tucson, AZ, USA. 2001.
- KUTNER, A. S.; CONTE, A. E.; NITTA, T. Análise Geológica e Caracterização dos Solos para avaliação do coeficiente de escoamento superficial na bacia do Alto Tietê. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14, 2001, Aracajú-SE. **Anais ... ABRH**, 2001. 14p. [1CD ROM].
- LANGAN, L. N.; LAMMERS, D. A. Definitive Criteria for Hydrologic Soil Groups. **Soil Survey Horizons**, v. 32, n.3, p. 69-77.
- LIMA, J. M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Dispersão do material do solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, n.1, p.85-90, 1990.
- LINSLEY JR., RAY K.; KOHLER, MAX A.; PAULHUS, JOSEPH L. H. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1949. 689 p.
- LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPCH, I. F.; OLIVEIRA, J.B. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. In: Simpósio sobre terraceamento agrícola, 1989, Campinas-SP. **Anais ... Fundação Cargill**, 1989. p.99-124.
- LOPES, P. R. C.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de tipo e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, n.1, p.71-75, 1987.
- LUMBRERAS, J. F. Regime hídrico do solo sob cobertura de floresta e de eucalipto na pré-amazônia maranhense. 1996. 87p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí-RJ, 1996.
- MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 152p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2002.

- MAIA, J. L. T.; RIBEIRO, M. R. Propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.1, p.79-87, 2004.
- MARQUES, J. D. O.; LIBARDI, P. L. ; TEIXEIRA, W. G. ; REIS, A. M. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um Latossolo Amarelo, na região Amazônica. **Acta Amazônica**, v.34, n.2, p.145-154, 2004.
- MARQUES, J. D.O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JÚNIOR, O. F.; MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazônica**, v.38, n.2, p.193-206, 2008.
- MARTINS, S. G. **Potencial erosivo da chuva na região dos Tabuleiros Costeiros – Aracruz (ES)**. 2005. 113p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2005.
- MCCUEN, R. H; KNIGHT, Z.; GILLIAN, A. C. Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index, **Journal of Hydrologic Engineering**, v.11, n.6, p. 597-602, 2006.
- MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; LOPES, D. Abstração inicial da chuva em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n.3, p.494-500, 2003.
- MEYER, L. D.; WISCHMEIER, W. H.; FOSTER, G. R. Mulch Rates Required for Erosion Control on Steep Slopes. **Soil Science Society of America Journal**, v.34, p.928-931, 1970.
- MOCKUS, V. **Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms**. Exhibit A in Appendix B, Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed, USDA, 1949.
- MOREIRA, S.G.; MARUCCI, R.C. **Milho para silagem: como obter altas produtividades?** 2008. Disponível em: <<http://www.rehagro.com.br/siterehagro/printpublicacao.do?cdnoticia=1738>> . Acesso em: 24 de abril de 2010.
- MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. 2005.

- 100p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP. 2005.
- MOSCA, A.A.O. **Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas.** 2003. 88p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP. 2003.
- MUSGRAVE, G.W. How much of the rain enters the soil? In: USDA. **Water: The yearbook of agriculture.** 1955. p.151-159.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part 1: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, n.3, 282–290, 1970.
- NIELSEN, R. D.; HJELMFELT JR, A. T. Hydrologic soil-group assignment. In: International Water Resources Engineering Conference, 1998, Memphis, Tennessee. **Proceedings ...** ASCE, 1998, Water Resources Engineering, v2, p.1297-1302.
- NOGUCHI, S.; TSUBOYAMA, Y.; SIDLE, R.C.; HOSODA, I. Morphological Characteristics of Macropores and the Distribution of Preferential Flow Pathways in a Forested Slope Segment. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.1413-1423, 1999.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service. Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. **In: National Engineering Handbook: Part 630, Hydrology.** 2004b. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2007.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service. Chapter 5: Streamflow Data. **In: National Engineering Handbook: Part 630, Hydrology.** 1997. Disponível em: <[ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology\\_hydraulics/neh630/](ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology_hydraulics/neh630/)>. Acesso em: 1 de abril de 2003.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service. Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. **In: National Engineering Handbook: Part 630, Hydrology.** 2007. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2007.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service. Chapter 8: Land Use and Treatment Classes. **In: National Engineering Handbook: Part 630, Hydrology.** 2002. Disponível em:

<[ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology\\_hydraulics/neh630/](ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology_hydraulics/neh630/)>. Acesso em: 1 de abril de 2003.

NRCS - Natural Resources Conservation Service. Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes. **In: National Engineering Handbook: Part 630, Hydrology**. 2004a. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2007.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia Aplicada**. 2.ed. Piracicaba: FEALQ, 2005. 574 p.

PAIVA, A. Q.; SOUZA, L. S.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M. Propriedades físico-hídricas de solos de uma topossequência de tabuleiro do Estado da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.11, p.2295-2302, nov. 2000.

PONCE, V. M; HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number: Has it Reached Maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v.1, n.1, p. 11-19, 1996.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>, 2009.

RALLISON, R. E.; MILLER, N. Past, present, and future SCS runoff procedure. Rainfall-Runoff Relationship. **Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, 1981 at Mississippi State, Mississippi, U.S.A.** Edited by Vijay P. Singh. Department of Civil Engineering. Louisiana State University. Baton Rouge, Louisiana 70803, USA. Water Resources Publications, p. 353-363, 1982.

RAWLS, W. J., ONSTAD, C. A., RICHARDSON, H.H. Residue and tillage effects on SCS runoff curve numbers. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.23, n.2, p. 357-361, 1980.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of Soil Water Properties. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.25, n.5, p. 1316-1320, 1982.

RIETZ, P. D. **Effects of Land Use on Runoff Curve Numbers**. 2000. 115p. Thesis (Masters of Science with a major in Watershed Management) – School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, Tucson, AZ, USA. 2000.

- RIETZ, P. D.; HAWKINS, R. H. Effects of Land Use on Runoff Curve Number. In: Symposium of Watershed Management and Operations Management, 2000, Fort Collins, Colorado, USA. **Proceedings ...** American Society of Civil Engineering, 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/40499\(2000\)110](http://dx.doi.org/10.1061/40499(2000)110)>. Acesso em: 15 de agosto de 2006.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840p.
- ROBICHAUD, P. R. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. **Journal of Hydrology**, v.231-232, p. 220–229, 2000.
- SANTOS, D.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; EVANGELISTA, A. R.; CRUZ FILHO, A. B.; TEIXEIRA, W. G. Perdas de solo e produtividade de pastagens nativas melhoradas sob diferentes práticas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.2, fev. 1998.
- SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. 2004. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2004.
- SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n.º 4, p. 19-29, Out/Dez, 2005b.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n.º 4, p. 5-18, Out/Dez, 2005a.
- SCHNEIDER, L. E.; MCCUEN, R. H. Statistical guidelines for curve number generation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, n.3, 282-290, 2005.
- SCHROEDER, S. A. Reliability of SCS curve number method on semi-arid, reclaimed mine lands. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environmental**, v. 8, n.2, p.41-45, 1994.

- SCS – Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology.** 1972.
- SCS – Soil Conservation Service. **Urban Hydrology of Small Watersheds.** USDA, SCS, 1986. (Technical Release 55).
- SETZER, J; PORTO, R. L. L. Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo. **Boletim Técnico DAEE**, v. 2, n.2, p.81-104, 1979.
- SHARMA, K. D. Modified Runoff Curve Numbers for Bare Crust-forming Sandy Soils. *Australian Journal of Soil Research*, v.25, p.541-545, 1987.
- SHERMAN, L. K. The unit hydrograph method. In: Meinzer, O. E. (Editor). **Physics of the Earth.** New York: Dove Publications, 1949. p. 514-525.
- SHIPITALO, M. J.; DICK, W. A.; EDWARDS, W. M. Conservation Tillage and Macropore Factors that Affect Water Movement and the Fate of Chemicals. **Soil and Tillage Research**, v.53, p.167-183, 2000.
- SIGRH – Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. **Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo.** Disponível em: <[www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/regnet.exe](http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/regnet.exe)>. Acesso em: 18 de agosto de 2008.
- SILVA JÚNIOR, A. R. **Características hidrológicas de duas bacias de drenagem experimentais.** 1990. 93p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 1990.
- SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n.4, p.677-684, 1997.
- SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. Runoff measurement and prediction for a watershed under natural vegetation in central Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.4, p.695-701, 1999.

- SIMANTON, J. R., HAWKINS, R. H., SARAVI, M. M; RENARD, K. G. Runoff Curve Number Variation with Drainage Area, Walnut Gulch, Arizona. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 39, n. 4, p.1391-1394, 1996.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF. **Soil survey manual**. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18, 1993.
- SOUZA, M. S. **Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da região Norte Fluminense**. 2004. 72p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos do Goytacazes-RJ, 2004.
- SPRINGER, E.P.; HAWKINS, R.H. Curve Number and peak responses following the Cerro Grande fire on a small watershed. In: *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges*. 2005, Williamsburg, VA. **Proceedings ...** Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 2005. 12p. [1CD-ROM].
- SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. O. **Bacia Experimental de Sumé: Descrição e Dados Coletados**. Campina Grande: UFCG/CNPq, 2003. 129p.
- STEFANI, H. I.; BURIOL, G. A.; MUTTI, L. S. M. Preparo da superfície em Planossolo cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.14, n.2, p.111-117, 1990.
- TEIXEIRA, C. F. A. **Desempenho do tensiômetro com manômetro de mercúrio, reflectômetro no domínio do tempo e sonda de nêutrons no monitoramento do teor de água no solo**. 2001.115 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2001.
- TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guaíra-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. 1991. 67p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1991.
- TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: Tucci, C. E. M. (Organizador). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRG:ABRH. p.391-441.

- VAN MULLEM, J. E.; WOODWARD, D. E.; HAWKINS, R. H.; HJELMFELT, A. T. Runoff Curve Number Method: Beyond the Handbook. In: Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, 2, 2002, Las Vegas, NV. **Proceedings ...** U.S. Geological Survey Advisory Committee on Water Information, 2002. 10p. [1CD-ROM].
- WOOD, M. K.; BLACKBURN, W. H. An Evaluation of the Hydrologic Soil Groups as Used in the SCS Runoff Method on Rangelands. **Water Resources Bulletin**, v.20, n.3, p. 379-389, June 1984.
- WOODWARD, D. E.; HAWKINS, R. H.; HJELMFELT, A. T.; VAN MULLEM, J. E.; QUAN, Q. D. Curve Number Method: Origins, applications, and limitations. In: Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, 2, 2002, Las Vegas, NV. **Proceedings ...** U.S. Geological Survey Advisory Committee on Water Information, 2002. 10p. [1CD-ROM].
- WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, 251, 123-150, 2001.
- ZIMBACK, C. R. L. **Levantamento semidetalhado e caracterização hídrica de solos provenientes do grupo Bauru, em duas bacias hidrográficas, na região de Marília-SP.** 1993. 184p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 1993.
- ZIMBACK, C. R. L.; CARVALHO, A. M. Caracterização hídrica dos solos de três bacias hidrográficas, na região de Marília (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.3, p.459-466,1996.



## **APÊNDICES**



## **APÊNDICE A – Dados de Condutividade Hidráulica Saturada**



Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado.

<b>Perfil</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)</b>	<b>Grupamento Textural (Embrapa, 1979)</b>	<b>Ks (mm/h)</b>
1	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado				
	Ap	0 - 12	Areia Franca	Arenosa	119
	E	12 - 28	Areia Franca	Arenosa	92
	Bt1	25 - 51	Franco argilo arenoso	Média	65
	Bt2	57 - 87	Franco argilo arenoso	Média	12
	Bt3	87 - 120	Franco argilo arenoso	Média	47
	2BC	120 - 144	Franco arenoso	Média	50
	3C1	144 - 176	Franco arenoso	Média	79
	4C2	176+	Franco arenoso	Média	78
2	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado				
	Ap	0 - 11	Areia Franca	Arenosa	142
	E	11 - 25	Areia Franca	Arenosa	127
	Bt1	25 - 55	Franco argilo arenoso	Média	83
	Bt2	55 - 86	Franco argilo arenoso	Média	12
	Bt3	86 - 115	Franco argilo arenoso	Média	46
	BC	115 - 137	Franco arenoso	Média	67
	2C1	137 - 180	Franco arenoso	Média	71
	3C2	180 - 200	Franco arenoso	Média	90
3	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Epidistrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo suave ondulado				
	Ap	0 - 28	Areia	Arenosa	103
	E	28 - 65	Areia Franca	Arenosa	94
	Bt1	65 - 80	Franco arenoso	Média	44
	Bt2	80 - 108	Franco argilo arenoso	Média	22
	Bt3	108 - 138	Franco argilo arenoso	Média	42
	BC	138 - 151	Franco argilo arenoso	Média	51
	C1	151 - 200	Franco arenoso	Média	52
4	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Epidistrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado				
	Ap	0 - 20	Areia Franca	Arenosa	112
	E	20 - 58	Areia Franca	Arenosa	97
	Bt1	58 - 72	Franco arenoso	Média	43
	Bt2	72 - 99	Franco argilo arenoso	Média	24
	Bt3	99 - 135	Franco argilo arenoso	Média	35
	BC	135 - 160	Franco argilo arenoso	Média	34
	C1	160 - 200	Franco argilo arenoso	Média	33

(continua)

Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
5	Brunizem Avermelhado, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito				
	A1	0 - 7	Franco arenoso	Média	113
	AB	7 - 30	Franco arenoso	Média	72
	BA	30 - 47	Franco arenoso	Média	70
	Bi	47 - 80	Franco arenoso	Média	69
6	Brunizem Avermelhado, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito				
	A1	0 - 10	Franco arenoso	Média	109
	AB	10 - 31	Franco arenoso	Média	101
	BA	31 - 47	Franco arenoso	Média	101
	Bi	47 - 71	Franco arenoso	Média	93
7	Glei Pouco Húmico distrófico Tb, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo suave ondulado				
	Ap	0 - 10	Areia	Arenosa	143
	A/C	10 - 23	Areia	Arenosa	140
	Cg1	23 - 61	Areia	Arenosa	140
	Cg2	61 - 121	Areia	Arenosa	140
	Cg3	121 - 178	Areia	Arenosa	133
	Cg4	178 - 200	Areia	Arenosa	131
8	Glei Pouco Húmico distrófico Tb, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo suave ondulado				
	Ap	0 - 13	Franco arenoso	Média	151
	A/C	13 - 21	Franco arenoso	Média	142
	Cg1	21 - 47	Areia Franca	Arenosa	139
	Cg2	47 - 101	Franco arenoso	Média	133
	Cg3	101 - 152	Areia Franca	Arenosa	130
	Cg4	152 - 200	Franco arenoso	Média	121
9	Solo Aluvial Eutrófico Tb, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo plano				
	Ap	0 - 14	Areia Franca	Arenosa	141
	C1	14 - 45	Areia Franca	Arenosa	140
	2C2	45 - 120	Areia	Arenosa	132
	3C3	120 - 127	Areia Franca	Arenosa	130
	4C4	127 - 138	Areia Franca	Arenosa	131
	5C5	138 - 155	Franco arenoso	Média	131
	6C6	155 - 167	Franco arenoso	Média	129
	7C7	167 - 200	Franco arenoso	Média	127

(continua)

Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
10	Solo Aluvial Eutrófico Tb, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical hidrófila de várzea, relevo plano				
	Ap	0 - 21	Franco arenoso	Média	145
	C1	21 - 56	Areia Franca	Arenosa	143
	2C2	56 - 112	Areia Franca	Arenosa	140
	3C3	112 - 150	Areia Franca	Arenosa	144
	4C4	150 - 200	Areia Franca	Arenosa	156
11	Solo Litólico Eutrófico Ta, A chernozêmico, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito				
	Ap	0 - 37	Franco arenoso	Média	118
	Cr	37 - 55	Franco arenoso	Média	115
12	Solo Litólico Eutrófico Ta, A chernozêmico, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado, substrato arenito				
	Ap	0 - 27	Franco arenoso	Média	111
	Cr	27 - 45	Areia Franca	Arenosa	102
13	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, relevo ondulado				
	Ap	0 - 15	Areia Franca	Arenosa	140
	Bt2	50 - 93	Franco argilo arenoso	Média	20
14	Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico Epidistrófico Tb abrupto, A moderado, textura arenosa/média, relevo suave ondulado				
	Ap	0 - 25	Areia Franca	Arenosa	109
	Bt2	66 - 102	Franco arenoso	Média	32
15	Cambissolo Eutrófico, A chernozêmico, textura média, relevo ondulado, substrato arenito				
	A1	0 - 12	Franco arenoso	Média	99
	Bi	35 - 62	Franco arenoso	Média	80
16	Glei Pouco Húmico distrófico Tb, A moderado, textura arenosa, relevo suave ondulado				
	Ap	0 - 15	Areia	Arenosa	153
	2Cg2	59 - 103	Areia	Arenosa	144
17	Solo Aluvial Eutrófico Tb, A moderado, textura arenosa, relevo plano				
	Ap	0 - 18	Areia Franca	Arenosa	142
	2C2	48 - 99	Areia	Arenosa	147
18	Solo Litólico Eutrófico Ta, A chernozêmico, textura arenosa, relevo ondulado, substrato arenito				
	Ap	0 - 29	Franco arenoso	Média	110
	Cr	29 - 45	Franco arenoso	Média	98

(continua)

Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
19	Latossolo Roxo ácrico, A moderado, textura argilosa				
	A1	0 - 25	Argila	Argilosa	1297
	A/B	27 - 45	Argila	Argilosa	1249
	Bw1	45 - 77	Argila	Argilosa	963
	Bw2	77 - 165	Argila	Argilosa	807
20	Latossolo Roxo ácrico, A moderado, textura argilosa				
	Ap	5 - 20	Argila	Muito Argilosa	297
	A/B	25 - 50	Argila	Muito Argilosa	894
	Bw1	50 - 70	Argila	Muito Argilosa	660
	Bw2	90 - 110	Argila	Muito Argilosa	912
21	Latossolo Roxo ácrico, A moderado, textura argilosa				
	Ap	0 - 24	Franco argiloso	Média	133
	A/B	24 - 60	Argila	Argilosa	474
	Bw1	60 - 95	Argila	Argilosa	586
	Bw2	95 - 200	Argila	Argilosa	854
22	Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura argilosa				
	A1	0 - 20	Franco argiloso	Média	1333
	A/B	20 - 40	Franco argiloso	Argilosa	829
	Bw1	40 - 70	Argila	Argilosa	999
	Bw2	70 - 130	Argila	Argilosa	870
23	Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura argilosa				
	Ap	0 - 18	Franco argiloso	Argilosa	143
	A/B	18 - 45	Argila	Argilosa	165
	Bw1	45 - 70	Argila	Argilosa	258
	Bw2	70 - 180	Argila	Argilosa	395
24	Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura argilosa				
	Ap	0 - 10	Argila	Argilosa	80
	A/B	10 - 45	Argila	Argilosa	232
	Bw1	45 - 85	Argila	Argilosa	465
	Bw2	85 - 125	Argila	Argilosa	491
25	Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura argilosa				
	A1	0 - 25	Argila	Argilosa	1096
	A/B	25 - 55	Argila	Argilosa	939
	Bw1	55 - 100	Argila	Argilosa	812
	Bw2	100 - 200	Argila	Argilosa	644
26	Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura argilosa				
	Ap	0 - 25	Franco argiloso	Argilosa	215
	A/B	25 - 48	Argila	Muito Argilosa	546
	Bw1	48 - 100	Argila	Argilosa	551
	Bw2	100 - 180	Argila	Argilosa	511

(continua)



Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
27	Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura argilosa				
	Ap	0 - 15	Franco argiloso	Média	241
	A/B	15 - 55	Argila	Argilosa	446
	Bw1	55 - 90	Argila	Argilosa	610
	Bw2	90 - 180	Argila	Argilosa	516
28	Latossolo Amarelo, textura argilosa				
	A	0 - 15	Franco argilo arenoso	Média	878
	AB	15 - 35	Franco argilo arenoso	Média	471
	BA	35 - 80	Argila arenosa	Argilosa	63
29	Latossolo Amarelo, textura argilosa				
	A	0 - 17	Franco argilo arenoso	Média	372
	AB	17 - 35	Franco argilo arenoso	Média	142
	BA	35 - 70	Argila arenosa	Argilosa	40
30	Latossolo Amarelo, textura argilosa				
	A	0 - 20	Franco argilo arenoso	Média	596
	AB	20 - 40	Argila arenosa	Argilosa	165
	BA	40 - 80	Argila	Argilosa	54
31	Latossolo Amarelo, textura argilosa				
	A	0 - 17	Franco argilo arenoso	Média	585
	AB	17 - 35	Argila arenosa	Argilosa	263
	BA	35 - 70	Argila	Argilosa	26
32	Cambissolo distrófico (epialico), Tb, A moderado, textura muito argilosa, fase campo cerrado, relevo ondulado, substrato fítilo				
	Ap	0 - 18	Argila	Muito Argilosa	104
	Bi	28 - 36	Argila	Muito Argilosa	2
	C	91 - 110	Argila	Muito Argilosa	25
33	Latossolo Amarelo argissólico				
	Ap	0 - 18	Franco argilo arenoso	Média	96,8
	AB	18 - 46	Argila arenosa	Argilosa	32,4
	BA	46 - 80	Argila	Argilosa	11,3
	Bw1	80 - 150	Argila	Argilosa	8,6
	Bw2	150 - 160	Argila	Argilosa	46,5
34	Argissolo Amarelo coeso				
	Ap	0 - 20	Franco argilo arenoso	Média	55,1
	AB	20 - 46	Argila arenosa	Argilosa	51,5
	BA	46 - 67	Argila	Argilosa	7,1
	Bt1	67 - 103	Argila	Argilosa	2,3
	Bt2	103 - 124	Argila	Argilosa	3,3
	BC	124 - 150	Argila	Argilosa	14,3

(continua)

Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
35	Argissolo Acinzentado				
	Ap	0 - 30	Areia Franca	Arenosa	165,9
	AE	30 - 70	Areia Franca	Arenosa	108
	E1	70 - 87	Areia Franca	Arenosa	87,9
	E2	87 - 105	Areia Franca	Arenosa	47,8
	E3	105 - 130	Areia Franca	Arenosa	14,1
	Bt	130 - 150	Franco arenoso	Média	10,8
36	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa				
	A	0 - 8	Argila	Muito Argilosa	1039
	BA	8 - 43	Argila	Muito Argilosa	118
	Bw1	43 - 90	Argila	Muito Argilosa	553
	Bw2	90 - 130	Argila	Muito Argilosa	363
	Bw3	130 - 185	Argila	Muito Argilosa	213
37	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa				
	A	0 - 10	Argila	Muito Argilosa	244
	BA	10 - 45	Argila	Muito Argilosa	175
	Bw1	45 - 87	Argila	Muito Argilosa	434
	Bw2	87 - 135	Argila	Muito Argilosa	344
	Bw3	135 - 190	Argila	Muito Argilosa	320
38	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa				
	A	0 - 16	Argila	Muito Argilosa	797
	BA	16 - 43	Argila	Muito Argilosa	170
	Bw1	43 - 86	Argila	Muito Argilosa	178
	Bw2	86 - 129	Argila	Muito Argilosa	182
	Bw3	129 - 175	Argila	Muito Argilosa	138
39	Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico, A moderado, textura muito argilosa				
	A	0 - 12	Argila	Muito Argilosa	816
	BA	12 - 46	Argila	Muito Argilosa	255
	Bw1	46 - 87	Argila	Muito Argilosa	243
	Bw2	87 - 132	Argila	Muito Argilosa	542
	Bw3	132 - 175	Argila	Muito Argilosa	142
40	Argissolo Amarelo abrupto fragipânico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta subperenefólia, relevo plano				
	A	0 - 16	Areia Franca	Arenosa	558
	AB	16 - 34	Franco arenoso	Média	224
	Bt	34 - 75	Argila arenosa	Argilosa	219
41	Argissolo Amarelo abrupto fragipânico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta subperenefólia, relevo plano				
	A	0 - 18	Areia Franca	Arenosa	239
	AB	18 - 35	Franco arenoso	Média	197
	Bt	35 - 73	Argila arenosa	Argilosa	116

(continua)

Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
42	Argissolo Amarelo abrupto fragipânico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta subperenefólia, relevo plano				
	A	0 - 18	Franco arenoso	Média	170
	AB	18 - 30	Franco arenoso	Média	116
	Bt1	30 - 59	Argila arenosa	Argilosa	60
43	Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico				
	-	0 - 40	Argila	Argilosa	154,8
	-	40 - 50	Argila	Muito Argilosa	126,0
	-	50 - 60	Argila	Muito Argilosa	36,0
	-	60 - 70	Argila	Muito Argilosa	27,4
	-	70 - 80	Argila	Muito Argilosa	29,2
	-	80 - 90	Argila	Muito Argilosa	24,5
	-	90 - 100	Argila	Muito Argilosa	23,8
	-	100 - 110	Argila	Muito Argilosa	36,0
	-	110 - 120	Argila	Muito Argilosa	39,6
	-	120 - 130	Argila	Muito Argilosa	9,4
44	Latossolo Vermelho Escuro Distrófico, álico A moderado, textura argilosa, fase floresta/cerrado e relevo plano				
	Ap	0 - 10	Argila	Argilosa	160
	A3	10 - 35	Argila	Argilosa	190
	B1	35 - 70	Argila	Argilosa	306
	B21	70 - 150	Argila	Argilosa	250
45	Latossolo Vermelho Escuro Distrófico, epiálico A moderado, textura argilosa, fase cerrado e relevo plano				
	A1	0 - 18	Argila	Muito Argilosa	376
	A3	18 - 30	Argila	Muito Argilosa	202
	B1	30 - 60	Argila	Muito Argilosa	390
	B21	60 - 120	Argila	Muito Argilosa	287
46	Latossolo Vermelho Escuro Distrófico, epiálico A moderado, textura média, fase cerrado e relevo plano				
	A1	0 - 18	Franco arenoso	Média	314
	A3	18 - 35	Franco argilo arenoso	Média	213
	B1	35 - 60	Franco argilo arenoso	Média	151
	B21	60 - 105	Franco argilo arenoso	Média	202
	B22	105 - 135	Franco argilo arenoso	Média	162
	B23	135 - 175	Franco argilo arenoso	Média	160

(continua)

Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
47	Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, epiálico, A moderado, textura média, fase cerrado, relevo plano				
	A1	0 - 16	Areia Franca	Arenosa	449
	A3	16 - 30	Franco arenoso	Média	409
	B1	30 - 60	Franco arenoso	Média	331
	B21	60 - 140	Franco argilo arenoso	Média	627
	B22	140 - 210	Franco argilo arenoso	Média	248
48	Latossolo Amarelo Distrófico, extremamente profundo				
	A	0 - 12	Argila	Argilosa	244,5
	BA	12 - 45	Argila	Muito Argilosa	316,4
	Bw1	45 - 75	Argila	Muito Argilosa	920
	Bw2	75 - 100	Argila	Muito Argilosa	237,8
49	Planossolo				
	A1	0 - 22	Franco siltoso	Média	1,3
	A2	22 - 54	Franco siltoso	Média	23,6
	AB	54 - 90	Franco siltoso	Média	37,7
	Bt	90 - 120	Argila	Argilosa	0,15
50	Latossolo Amarelo Distrófico				
	A1	0 - 16	Argila	Muito Argilosa	912
	AB	16 - 46	Argila	Muito Argilosa	323
	Bw1	46 - 65	Argila	Muito Argilosa	186
	Bw2	65 - 150	Argila	Muito Argilosa	263
51	Latossolo Amarelo Distrófico				
	A	0 - 30	Argila	Muito Argilosa	1000
	AB	30 - 48	Argila	Muito Argilosa	363
	Bw1	48 - 110	Argila	Muito Argilosa	295
52	Latossolo Amarelo Distrófico				
	A	0 - 20	Argila	Muito Argilosa	1777
	AB	20 - 62	Argila	Muito Argilosa	1412
	Bw1	62 - 120	Argila	Muito Argilosa	302
53	Latossolo Vermelho Distrófico				
	A1	0 - 25	Franco argiloso	Média	1174
	A2	25 - 60	Argila siltosa	Argilosa	758
	BA	60 - 102	Argila	Argilosa	1288
	Bw1	102 - 152	Argila	Muito Argilosa	234
	Bw2	152 - 200	Argila	Muito Argilosa	257

(continua)

Tabela A-1. Dados de condutividade hidráulica de solo saturado (continuação).

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Classe Textural do USDA (Soil Survey Division Staff, 1993)	Grupamento Textural (Embrapa, 1979)	Ks (mm/h)
54	Latossolo Vermelho Distrófico argissólico				
	A1	0 - 20	Franco argiloso	Média	2510
	A2	20 - 33	Franco argiloso	Média	2817
	BA	33 - 105	Argila	Argilosa	1022
	Bw1	105 - 177	Argila	Muito Argilosa	209
	Bw2	177 - 220	Argila	Muito Argilosa	100
55	Latossolo Vermelho Distrófico				
	A1	0 - 18	Franco argilo arenoso	Média	1380
	BA	18 - 28	Franco argiloso	Argilosa	331
	Bw1	28 - 58	Argila	Argilosa	812
	Bw2	58 - 96	Argila	Argilosa	123
	Bw3	96 - 180	Argila arenosa	Argilosa	446
56	Neossolo Quartzarênico Órtico gleico				
	Ap	0 - 16	Areia Franca	Arenosa	185,4
	A31	16 - 30	Areia Franca	Arenosa	211,5
	A32	30 - 50	Areia	Arenosa	377,2
	AC	50 - 66	Areia	Arenosa	345,4
	C1	66 - 84	Areia	Arenosa	262,7
	C2	84 - 104	Areia	Arenosa	380,7
	C3	104 - 150	Areia	Arenosa	363,2
57	Cambissolo Háplico Tb Distrófico gleico				
	Ap	0 - 10	Argila siltosa	Argilosa	471,1
	A/Bi	10 - 22	Argila siltosa	Argilosa	441,1
	B1i	22 - 70	Argila	Argilosa	332
	B2ig	70 - 114	Argila siltosa	Argilosa	354,8
	B3ig	114 - 125	Argila	Muito Argilosa	291,4
	IICx	125 - 150	Franco argilo arenoso	Média	33,7
58	Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico latossólico				
	Ap	0 - 10	Argila arenosa	Argilosa	5,4
	A31	10 - 20	Argila arenosa	Argilosa	20,5
	A32	20 - 35	Argila arenosa	Argilosa	90,6
	Bt1	35 - 80	Argila	Argilosa	30,9
	Bt2	80 - 120	Argila	Argilosa	191,6
	Bt3	120 - 150	Argila	Argilosa	234



**APÊNDICE B – Código fonte dos programas em linguagem R para calibração do parâmetro CN usando os métodos: Assintótico, Mínimos Quadrados e  $P/S > 0,46$ .**





```

CNAS <- (function(arq,kmax) {
#=====
#                               CNAS versão tese --- 01-MAR-2010                               #
#                               #
#                               Função para determinar o CN a partir de dados observados       #
#                               Modelo Assintótico Padrão proposto por Hawkins (1993)         #
#                               #
#                               Código escrito por                                           #
#                               Aderson Sartori                                             #
#                               #
#                               Ref.:Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers #
#                               Numbers from Data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, #
#                               v. 119, n.º 2, p. 334-344, March/April, 1993.                #
#=====

pQ <- function(P,CN){S<-(25400/CN)-254
      ifelse(P<0.2*S,0,((P-0.2*S)^2)/(P+0.8*S))}
pCN <- function(P,CNi,k) {CNi + (100-CNi)*exp(-k*P)}
tmp <- read.csv2(paste(arq,".csv",sep=""))

with(tmp, {
### 1. Preparo dos dados
S <- 5*(P + 2*Q - sqrt(4*Q^2 + 5*P*Q))
CN <- (25400/(254 + S))
Por <- sort(P,decreasing=T)
Qor <- sort(Q,decreasing=T)
Sor <- 5*(Por + 2*Qor - sqrt(4*Qor^2 + 5*Por*Qor))
CNor <- (25400/(254 + Sor))
tmp <- cbind(tmp, S = S, CN = CN, Por = Por, Qor = Qor, Sor = Sor,
             CNor = CNor)

### 2. Método Assintótico para dados naturais
## Definição da função objetivo
f <- function(x) {
CNi <- x[1]
k <- x[2]
CNP <- CNi + (100 - CNi)*exp(-k*tmp$P)
SQres <- sum((CNP - tmp$CN)^2)
SQres}
## Busca dos parâmetros CNi e k
CNot <- optim(c(as.list(quantile(tmp$CN)[2])$'25%'[1],0.001), f,
             method = "L-BFGS-B", lower = c(0,0), upper = c(100,kmax))
## Valor final dos parâmetros
par1 <- CNot$par

## Medidas da qualidade do ajuste
# R quadrado - R2CN
R2CN <- (1 - CNot$value/with(tmp,sum((CN-mean(CN))^2)))
# Erro Padrão - SECN
SECN <- sqrt(CNot$value/(length(tmp$CN)-2))
# Estabilidade - STAB
PP <- sort(tmp$P,decreasing=F)
P90 <- PP[round(0.9*length(PP),0)]
CNP90 <- par1[1] + (100 - par1[1])*exp(-par1[2]*P90)
STAB <- 100*((100 - CNP90)/(100 - par1[1]))

## Medidas da qualidade da estimativa do escoamento superficial
# R quadrado - R2Q
R2Q <- 1 - sum((tmp$Q - pQ(tmp$P,par1[1]))^2)/with(tmp,
            sum((Q-mean(Q))^2))

```

```

# Erro Padrão - SEQ
SEQ <- sqrt((sum((tmp$Q - pQ(tmp$P,par1[1]))^2))/(length(tmp$P)-1))
# Erro médio - EMQ
BQ <- sum(pQ(tmp$P,par1[1])-tmp$Q)/(length(tmp$P))
# Erro médio relativo - EMQR
RBQ <- BQ/mean(tmp$Q)

### 3. Método Assintótico para dados ordenados
## Definição da função objetivo
fo <- function(x) {
  CNi <- x[1]
  k <- x[2]
  tmp <- with(tmp, cbind(tmp, CNP90or = CNi + (100 - CNi)*exp(-k*Por)))
  SQres <- with(tmp, sum((CNP90or - CNor)^2))
  SQres }
## Busca dos parâmetros CNi e k
CNota <- optim(c(as.list(quantile(tmp$CNor)[2])$'25%'[1],0.001), fo,
              method = "L-BFGS-B", lower = c(0,0), upper = c(100,kmax))
## Valor final dos parâmetros
par2 <- CNota$par

## Medidas da qualidade do ajuste
# R quadrado - R2CN
R2CNor <- (1-CNota$value/with(tmp, sum((CNor-mean(CNor))^2)))
# Erro Padrão
SECNor <- sqrt(CNota$value/(length(tmp$P)-2))
# Estabilidade - STAB
CNP90or <- par2[1] + (100 - par2[1])*exp(-par2[2]*P90)
STABor <- 100*((100 - CNP90or)/(100 - par2[1]))

## Medidas da qualidade da estimativa do escoamento superficial
# R quadrado - R2Q
R2Qor <- 1 - sum((tmp$Qor - pQ(tmp$Por,par2[1]))^2)/with(tmp,
  sum((Qor-mean(Qor))^2))
# Erro padrão - SEQ
SEQor <- sqrt((sum((tmp$Qor - pQ(tmp$Por,par2[1]))^2))/
  (length(tmp$Por)-1))
# Erro médio - EMQ
BQor <- sum(pQ(tmp$Por,par2[1]) - tmp$Qor)/(length(tmp$Por))
# Erro médio relativo - EMQR
RBQor <- BQor/mean(tmp$Qor)

### 4. Savando os resultados
fname <- paste(OUT, '/', arq, '_AS_result.txt', sep = '')
write("RESULTADOS - MÉTODO ASSINTÓTICO PADRÃO COM DADOS ORDENADOS",
  file=fname)
write(" ",file=fname,append=T)
write("1. Parâmetros do ajuste",file=fname, append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('k = ',round(par2[2],5), sep=''),file=fname,append=T)
write(paste('CNi = ',round(par2[1],2), sep=''),file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("2. Medidas da qualidade do ajuste",file=fname,append=T)
write(" ",file=fname, append=T)
write(paste('R2CN = ',round(R2CNor,4), sep=''),file=fname, append=T)
write(paste('SECN = ',round(SECNor,3), sep=''),file=fname,append=T)
write(paste('P90(mm) = ',round(P90,1), sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('CNP90 = ',round(CNP90or,2), sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('STAB(%) = ',round(STABor,2), sep=''),file = fname, append=T)

```

```

write(" ",file=fname,append=T)
write("3. Medidas da qualidade da estimativa do escoamento",
      file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('R2Q      = ',round(R2Qor,4),sep=''),file = fname,
      append=T)
write(paste('SEQ (mm) = ',round(SEQor,3),sep=''),file = fname,
      append=T)
write(paste('EMQ (mm) = ',round(BQor,3),sep=''),file = fname,
      append=T)
write(paste('EMQR     = ',round(RBQor,3),sep=''),file=fname,append=T)
write(" ", file = fname, append=T)
write(" ", file = fname, append=T)
write("RESULTADOS - MÉTODO ASSINTÓTICO PADRÃO COM DADOS NATURAIS",
      file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("1. Parâmetros do ajuste",file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('k      = ',round(par1[2],5),sep=''),file=fname,append=T)
write(paste('CNi    = ',round(par1[1],2),sep=''),file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("2. Medidas da qualidade do ajuste",file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('R2CN    = ',round(R2CN,4),sep=''),file = fname,
      append=T)
write(paste('SECN    = ',round(SECN,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('P90(mm) = ',round(P90,1),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('CNP90   = ',round(CNP90,2),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('STAB(%) = ',round(STAB,2),sep=''),file = fname,
      append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("3. Medidas da qualidade da estimativa do escoamento",
      file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('R2Q     = ',round(R2Q,4),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('SEQ(mm) = ',round(SEQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQ(mm) = ',round(BQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQR    = ',round(RBQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
})
})

#===== EXEMPLO DE APLICAÇÃO =====#

# 1. Configurar o diretório onde se encontra o arquivo de dados
setwd("C:/ADER_ESTUDO/CNdados")
# 2. Criar um diretório para gravar os resultados
# Isto deve ser feito pelo windows explorer
# 3. Configurar o diretório onde serão gravados os resultados
OUT <- "C:/ADER_ESTUDO/CNres"
# 4. Carregar a função CNAS
load("C:/ADER_ESTUDO/CNscripts/CNAS.RData")
# 5. Executar a função CNAS
CNAS("EC01",0.6)

# OBSERVAÇÕES:

# 1. EC01 é o nome do arquivo sem extensão que contém os dados de chuva (P) e
# de escoamento superficial (Q) no fomato CSV2. Neste formato os campos são
# separados por ponto e vírgula e o separador decimal é a vírgula.

```

# 2. O valor 0,6 foi o máximo adotado para a pesquisa da constante de decaimento  
# do modelo assintótico padrão, neste exemplo. Em geral ele funciona bem para  
# a maioria dos conjuntos de dados. No entanto, para alguns casos, pode  
# ser necessário alterar este valor para uma boa convergência.

# 3. Dados da bacia EC01 no formato CSV2 - Arquivo "EC01.csv"

```
DATA;P;Q
1985-12-27;6,1;0,8
1986-01-10;9,7;3,5
1985-12-05;11,8;8,2
1986-01-13;12,6;4,3
1986-02-13;15,6;2
1986-01-29;16,1;0,1
1986-01-15;17,3;4
1985-11-11;18,8;0,1
1986-01-28;18,9;2
1985-10-30;19;4
1985-12-18;19,2;5,9
1985-12-02;21,8;1,2
1986-01-08;26,2;4,2
1986-01-07;31,3;4
1986-03-06;33,8;5,5
1986-02-06;35,2;13,2
1986-03-03;35,9;4,7
1986-04-30;44,6;11,8
1985-12-23;49,1;7
1986-01-02;51,9;25,3
1986-03-10;61,4;21
1985-12-26;61,6;10,3
1985-11-26;62,6;25,1
1986-02-17;71;11,1
```

#=====

```

CNAV <- (function(arq,kmax,Pmin) {
#=====
#                               CNAV versão tese --- 01-MAR-2010                               #
#                               #                                                                 #
#                               Função para determinar o CN a partir de dados observados         #
#                               Modelo Assintótico Violento proposto por Hawkins(1993)           #
#                               #                                                                 #
#                               Código escrito por                                             #
#                               Aderson Sartori                                               #
#                               #                                                                 #
#                               Ref.:Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic Determination of Runoff Curve #
#                               Numbers from Data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, #
#                               v. 119, n.º 2, p. 334-344, March/April, 1993.                 #
#=====

pQ  <- function(P,CN){S<-(25400/CN)-254
      ifelse(P<0.2*S,0,((P-0.2*S)^2)/(P+0.8*S))}
pCN <- function(P,CNi,k) {CNi*(1-exp(-k*P))}
tmp <- read.csv2(paste(arq,".csv",sep=""))

with(tmp, {
### 1. Preparo dos dados
S    <- 5*(P + 2*Q - sqrt(4*Q^2 + 5*P*Q))
CN   <- (25400/(254 + S))
Por  <- sort(P,decreasing=T)
Qor  <- sort(Q,decreasing=T)
Sor  <- 5*(Por + 2*Qor - sqrt(4*Qor^2 + 5*Por*Qor))
CNor <- (25400/(254 + Sor))
tmp  <- cbind(tmp, S = S, CN = CN, Por = Por, Qor = Qor, Sor = Sor,
              CNor = CNor)
tmp  <- with(tmp,tmp[Por>Pmin,])
### 2. Método Assintótico para dados ordenados
## Definição da função objetivo
fo <- function(x) {
CNi <- x[1]
k   <- x[2]
tmp <- with(tmp, cbind(tmp, CNPor = CNi*(1 - exp(-k*Por))))
SQres <- with(tmp, sum((CNPor - CNor)^2))
SQres }
## Busca dos parâmetros CNi e k
CNota <- optim(c(as.list(quantile(tmp$CNor)[2])$'25%'[1],0.001), fo,
              method = "L-BFGS-B", lower = c(0,0), upper = c(100,kmax))
## Valor final dos parâmetros
par2 <- CNota$par
## Medidas da qualidade do ajuste
# R quadrado - R2CN
R2CNor <- (1-CNota$value/with(tmp,sum((CNor-mean(CNor))^2)))
# Erro Padrão
SECNor <- sqrt(CNota$value/(length(tmp$P)-2))
# Estabilidade - STAB
PP <- sort(tmp$Por,decreasing=F)
P90 <- PP[round(0.9*length(PP),0)]
CNP90or <- par2[1] + (100 - par2[1])*exp(-par2[2]*P90)
STABor <- 100*((100 - CNP90or)/(100 - par2[1]))
## Medidas da qualidade da estimativa do escoamento superficial
# R quadrado - R2Q
R2Qor <- 1 - sum((tmp$Qor - pQ(tmp$Por,par2[1]))^2)/with(tmp,
sum((Qor-mean(Qor))^2))
# Erro padrão - SEQ

```

```

SEQor<-sqrt((sum((tmp$Qor-pQ(tmp$Por,par2[1]))^2))/(length(tmp$Por)-1))
# Erro médio - EMQ
BQor <- sum(pQ(tmp$Por,par2[1]) - tmp$Qor)/(length(tmp$Por))
# Erro médio relativo - EMQR
RBQor <- BQor/mean(tmp$Qor)
### 4. Savando os resultados
fname <- paste(OUT,'/',arq,'_AV_result.txt',sep = '')
write("RESULTADOS - MÉTODO ASSINTÓTICO VIOLENTO COM DADOS ORDENADOS",
      file=fname)
write(" ",file=fname,append=T)
write("1. Parâmetros do ajuste",file=fname, append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('k = ',round(par2[2],5),sep=''),file=fname,append=T)
write(paste('CNI = ',round(par2[1],2),sep=''),file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("2. Medidas da qualidade do ajuste",file=fname,append=T)
write(" ",file=fname, append=T)
write(paste('R2CN = ',round(R2CNor,4),sep=''),file=fname,append=T)
write(paste('SECN = ',round(SECNor,3),sep=''),file=fname,append=T)
write(paste('P90 (mm) = ',round(P90,1),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('CNP90 = ',round(CNP90or,2),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('STAB(%) = ',round(STABor,2),sep=''),file = fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("3. Medidas da qualidade da estimativa do escoamento",
      file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('R2Q = ',round(R2Qor,4),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('SEQ (mm) = ',round(SEQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQ (mm) = ',round(BQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQR = ',round(RBQor,3),sep=''),file=fname,append=T)
write(" ", file = fname, append=T)
write(" ", file = fname, append=T)
})

#===== PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO =====#
# 1. Configurar o diretório onde se encontra o arquivo de dados
setwd("C:/ADER_ESTUDO/CNdados")
# 2. Criar um diretório para gravar os resultados
# Isto deve ser feito pelo windows explorer
# 3. Configurar o diretório onde serão gravados os resultados
OUT <- "C:/ADER_ESTUDO/CNres"
# 4. Carregar a função CNAV
load("C:/ADER_ESTUDO/CNscripts/CNAV.RData")
# 5. Executar a função CNAV
CNAV("LSC2",0.6,18)

# OBSERVAÇÕES:

# 1. LSC2 é o nome do arquivo sem extensão que contém os dados de chuva (P) e
# de escoamento superficial (Q) no fomato CSV2. Neste formato os campos são
# separados por ponto e vírgula e o separador decimal é a vírgula.

# 2. O valor 0,6 foi o máximo adotado para a pesquisa da constante de decaimento
# do modelo assintótico violento.

# 4. 18 é o valor mínimo da série ordenada de chuva a partir do qual se iniciou
# o comportamento Violento.
#=====#

```

```

CNLS <- (function(arq) {
#=====#
#           CNLS  versão tese  ---  01-MAR-2010           #
#           #                                           #
#           Função para determinar o CN a partir de dados observados #
#           Método dos Mínimos Quadrados                 #
#           #                                           #
#           Código escrito por                           #
#           Aderson Sartori                             #
#           #                                           #
#=====#

tmp <- read.csv2(paste(arq, ".csv", sep=""))

with(tmp, {
### 1. Preparo dos dados
S <- 5*(P + 2*Q - sqrt(4*Q^2 + 5*P*Q))
CN <- (25400/(254 + S))
Por <- sort(P,decreasing=T)
Qor <- sort(Q,decreasing=T)
Sor <- 5*(Por + 2*Qor - sqrt(4*Qor^2 + 5*Por*Qor))
CNor <- (25400/(254 + Sor))
tmp <- cbind(tmp, S = S, CN = CN, Por = Por, Qor = Qor, Sor = Sor,
             CNor = CNor)

### 2. Método dos Mínimos Quadrados para dados naturais
pQ <- nls(Q~ifelse(P < 0.2*S,0,((P-0.2*S)^2)/(P+0.8*S)),data = tmp,
          start = c(S=50))
# Parâmetro calibrado - CN
CN <- with(as.list(coef(pQ)), (25400/(S+254)))
## Medidas da qualidade do ajuste
# R quadrdo - R2Q
R2Q <- (1 - sum(resid(pQ)^2)/with(tmp, sum((Q-mean(Q))^2)))
# Erro Padrão - SEQ
SEQ <- sqrt((sum(resid(pQ)^2))/(length(tmp$P)-1))
# Erro Médiado - EMQ
BQ <- -1*(sum(resid(pQ))/(length(tmp$Q)))
# Erro Médio Relativo - EMQR
RBQ <- BQ/mean(tmp$Q)

### 3. Método dos Mínimos Quadrados para dados ordenados
pQor <- nls(Qor ~ ifelse(Por < 0.2*Sor,0,((Por-0.2*Sor)^2)/
                    (Por+0.8*Sor)),data = tmp, start = c(Sor=50))
# Parâmetro calibrado - CN
CNor <- with(as.list(coef(pQor)), (25400/(Sor+254)))
## Medidas da qualidade do ajuste
# R quadrdo - R2Q
R2Qor <- (1 - sum(resid(pQor)^2)/with(tmp, sum((Qor-mean(Qor))^2)))
# Erro Padrão - SEQ
SEQor <- sqrt((sum(resid(pQor)^2))/(length(tmp$Qor)-1))
# Erro Médio - EMQ
BQor <- -1*(sum(resid(pQor))/(length(tmp$Qor)))
# Erro Médio Relativo - EMQR
RBQor <- BQor/mean(tmp$Qor)

### 4. Salvando Resultados
fname <- paste(OUT, '/', arq, '_LS_result.txt', sep = '')
write("RESULTADOS - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS COM DADOS ORDENADOS",
      file=fname)

```

```

write("  ",file=fname,append=T)
write("1. Parâmetro do ajuste",file=fname, append=T)
write("  ",file=fname,append=T)
write(paste('CN = ',round(CNor,2),sep=''),file=fname,append=T)
write("  ",file=fname,append=T)
write("2. Medidas da qualidade do ajuste",file=fname,append=T)
write("  ",file=fname, append=T)
write(paste('R2Q      = ',round(R2Qor,4),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('SEQ(mm) = ',round(SEQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQ(mm) = ',round(BQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQR     = ',round(RBQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write("  ", file = fname, append=T)
write("RESULTADOS - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS COM DADOS NATURAIS",
      file=fname,append=T)
write("  ", file = fname, append=T)
write("1. Parâmetro do ajuste",file=fname, append=T)
write("  ",file=fname,append=T)
write(paste('CN = ',round(CN,2),sep=''),file=fname,append=T)
write("  ",file=fname,append=T)
write("2. Medidas da qualidade do ajuste",file=fname,append=T)
write("  ",file=fname, append=T)
write(paste('R2Q      = ',round(R2Q,4),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('SEQ(mm) = ',round(SEQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQ(mm) = ',round(BQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQR     = ',round(RBQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
})
})

#===== PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO =====#

# 1. Configurar o diretório onde se encontra o arquivo de dados
setwd("C:/ADER_ESTUDO/CNdados")
# 2. Criar um diretório para gravar os resultados
# Isto deve ser feito pelo windows explorer
# 3. Configurar o diretório onde serão gravados os resultados
OUT <- "C:/ADER_ESTUDO/CNres"
# 4. Carregar a função CNLS
load("C:/ADER_ESTUDO/CNscripts/CNLS.RData")
# 5. Executar a função CNLS
CNLS("EC01")

# OBSERVAÇÃO:

# EC01 é o nome do arquivo sem extensão que contém os dados de chuva (P) e
# de escoamento superficial (Q) no fomato CSV2. Neste formato os campos são
# separados por ponto e vírgula e o separador decimal é a vírgula.

#=====#

```



```

CNPS <- (function(arq) {
#=====
#                               CNPS versão tese --- 01-MAR-2010                               #
#                               #                               #                               #
#                               Função para determinar o CN a partir de dados observados       #
#                               Método P/S > 0,46 proposto por Hawkins et al. (1985)         #
#                               #                               #                               #
#                               Código escrito por                                           #
#                               Aderson Sartori                                             #
#                               #                               #                               #
#                               Ref.: Hawkins, R. H., A. T. Hjelmfelt, Jr., and A. W. Zevenbergen (1985). #
#                               Runoff probability, storm depth, and curve numbers. J. Irrig. #
#                               and Drainage Eng. 111(4): 330-340.                         #
#=====

pQ <- function(P,CN) { S <- (25400/CN) - 254
                      ifelse(P < 0.2*S,0,((P-0.2*S)^2)/(P+0.8*S))}
tmp <- read.csv2(paste(arq,".csv",sep=""))

with(tmp, {
### 1. Preparo dos dados
S <- 5*(P + 2*Q - sqrt(4*Q^2 + 5*P*Q))
CN <- (25400/(254 + S))
Por <- sort(P,decreasing=T)
Qor <- sort(Q,decreasing=T)
Sor <- 5*(Por + 2*Qor - sqrt(4*Qor^2 + 5*Por*Qor))
CNor <- (25400/(254 + Sor))
tmp <- cbind(tmp, S = S, CN = CN, Por = Por, Qor = Qor, Sor = Sor,
            CNor = CNor)

### 2. Método P/S para dados naturais (Padrão)
tmp <- tmp[rev(order(tmp[, "P"])),1:length(tmp)]
k1 <- 0
SS <- 0
for (i in 1:(length(tmp$P))) {
  k1 <- k1+1
  SS <- SS + tmp$S[i]
  Sm <- SS/k1
  if (tmp$P[i]/Sm <= 0.46)
  { SS = SS-tmp$S[i]
    k1 = k1-1
  }
}
Sm <- SS/k1
CNm <- 25400/(Sm + 254)

## Medidas da qualidade da estimativa do escoamento superficial
# R quadrado - R2Q
R2Q <- 1 - sum((tmp$Q-pQ(tmp$P,CNm))^2)/with(tmp,sum((Q-mean(Q))^2))
# Erro Padrão - SEQ
SEQ <- sqrt((sum((tmp$Q - pQ(tmp$P,CNm))^2))/(length(tmp$P)-1))
# Erro Médio - EMQ
BQ <- sum(pQ(tmp$P,CNm)-tmp$Q)/(length(tmp$P))
# Erro Médio Relativo - EMQR
RBQ <- BQ/mean(tmp$Q)

### 3.Método P/S para dados ordenados (Uso originalmente não previsto)
tmp <- tmp[rev(order(tmp[, "Por"])),1:length(tmp)]
k2 <- 0
SSo <- 0

```

```

for (i in 1:(length(tmp$Por))) {
  k2 <- k2+1
  SSo <- SSo + tmp$Sor[i]
  Smo <- SSo/k2
  if (tmp$Por[i]/Smo <= 0.46)
    {SSo=SSo-tmp$Sor[i]
      k2=k2-1
    }
  Smo <- SSo/k2
  CNmo <- 25400/(Smo + 254)

## Medidas da qualidade da estimativa do escoamento superficial
# R quadrado - R2Q
R2Qor <- 1 - sum((tmp$Qor-pQ(tmp$Por,CNmo))^2)/
  with(tmp,sum((Qor-mean(Qor))^2))
# Erro Padrão - SEQ
SEQor <- sqrt((sum((tmp$Qor - pQ(tmp$Por,CNmo))^2))/
  (length(tmp$Por)-1))
# Erro Médio - EMQ
BQor <- sum(pQ(tmp$Por,CNmo) - tmp$Qor)/(length(tmp$Por))
# Erro Médio Relativo - EMQR
RBQor <- BQor/mean(tmp$Qor)
## Salvando os resultados
fname <- paste(OUT, '/', arq, '_PS_result.txt', sep = '')
write("RESULTADOS - MÉTODO P/S COM DADOS ORDENADOS",file = fname)
write(" ",file=fname,append=T)
write("1. Parâmetros do ajuste",file=fname, append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('Número de eventos considerados = ', k2, sep=''),
  file = fname, append=T)
write(paste('S(mm) = ',round(Smo,2),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('CN = ',round(CNmo,2),sep=''),file = fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("2. Medidas da qualidade da estimativa do escoamento",
  file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('R2Q = ',round(R2Qor,4),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('SEQ(mm) = ',round(SEQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQ(mm) = ',round(BQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQR = ',round(RBQor,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(" ", file = fname, append=T)
write("RESULTADOS - MÉTODO P/S COM DADOS NATURAIS (PADRÃO)",
  file = fname, append=T)
write(" ", file = fname, append=T)
write("1. Parâmetros do ajuste",file=fname, append=T)
write(" ", file = fname, append=T)
write(paste('Número de eventos considerados = ', k1, sep=''),
  file = fname, append=T)
write(paste('S(mm) = ',round(Sm,2),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('CN = ',round(CNm,2),sep=''),file = fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write("2. Medidas da qualidade da estimativa do escoamento",
  file=fname,append=T)
write(" ",file=fname,append=T)
write(paste('R2Q = ',round(R2Q,4),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('SEQ(mm) = ',round(SEQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQ(mm) = ',round(BQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
write(paste('EMQR = ',round(RBQ,3),sep=''),file = fname,append=T)
})

```

```

))

```

```

#===== EXEMPLO DE APLICAÇÃO =====#

# 1. Configurar o diretório onde se encontra o arquivo de dados
setwd("C:/ADER_ESTUDO/CNdados")
# 2. Criar um diretório para gravar os resultados
#   Isto deve ser feito pelo windows explorer
# 3. Configurar o diretório onde serão gravados os resultados
OUT <- "C:/ADER_ESTUDO/CNres"
# 4. Carregar a função CNPS
load("C:/ADER_ESTUDO/CNscripts/CNPS.RData")
# 5. Executar a função CNPS
CNPS("EC01")

# OBSERVAÇÃO:

#   EC01 é o nome do arquivo sem extensão que contém os dados de chuva (P) e
#   de escoamento superficial (Q) no fomato CSV2. Neste formato os campos são
#   separados por ponto e vírgula e o separador decimal é a vírgula.

#=====#

```



## **APÊNDICE C – Exemplo de aplicação da Classificação Hidrológica Proposta**



## Introdução

Neste trabalho foi proposta uma classificação hidrológica de solos baseada em atributos dos solos tropicais brasileiros. Informações sobre os atributos usados nos critérios de classificação são encontrados em boletins de levantamento pedológico e podem também ser inferidos pela classificação pedológica dos solos mapeados, desde que estejam classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Para ilustrar o uso da classificação hidrológica proposta foi escolhida a bacia hidrográfica do Ribeirão Guamium, a qual está localizada geograficamente entre as latitudes 22°31' e 22°42' sul e as longitudes 47°33' e 47°41' oeste, à margem direita do rio Piracicaba, região de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil.

## Caracterização da área de estudo

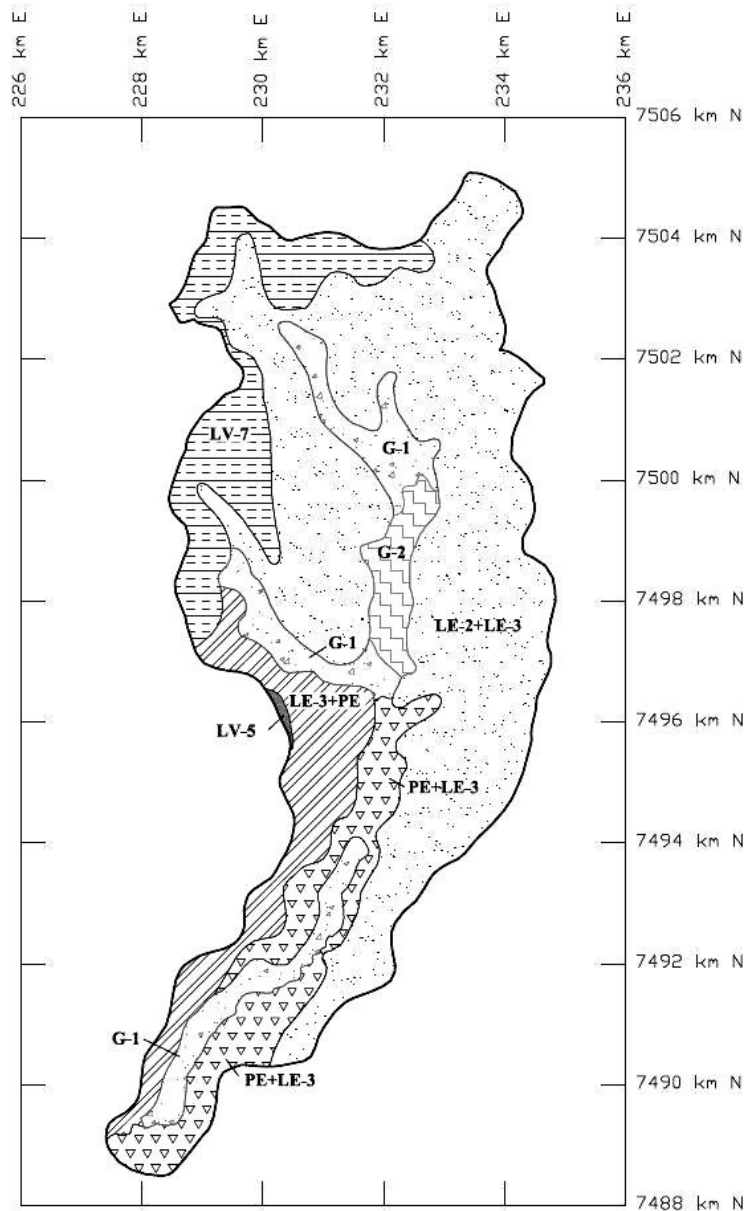
O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico, Cwa, isto é, subtropical úmido com inverno seco. As chuvas do mês mais seco não atingem 30 mm e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22° C. A média do mês mais frio é inferior a 18° C.

Objeto deste exemplo é a Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Guamium (MHRG), localizada a montante da ponte da Estrada do Melo, cujas coordenadas geográficas do exutório são 22°40'59'' sul e 47°39'11'' oeste. A MHRG delimitada a partir dessa seção está ilustrada na Figura C-1. Esta bacia tem 64,87 km<sup>2</sup> de área de drenagem e 47,22 km de perímetro.

As informações sobre as classes e/ou grupamentos de solos que ocorrem na bacia foram obtidas da Carta Pedológica Semidetalhada do Estado de São Paulo: Quadrícula de Piracicaba (SF-23-Y-A-IV), escala 1:100.000 (OLIVEIRA e PRADO, 1989). As unidades de mapeamento que ocorrem na MHRG estão ilustradas na Figura C-2.







Projeção UTM; MC = 45° W, Gr.  
Datum horizontal: Córrego Alegre, MG.

#### LEGENDA

 G-1	 LV-5
 G-2	 LV-7
 LE-2+LE-3	 PE+LE-3
 LE-3+PE	

#### LEGENDA EXPANDIDA

##### GLEISSOLOS

G-1. Grupamento indiscriminado de Gleis Pouco Húmicos

G-2. Grupamento indiscriminado de Gleis Húmicos.

##### LATOSSOLOS

LE-2. Latossolo Vermelho-Escuro Álico, A moderado, textura argilosa ou muito argilosa. Unidade Limeira.

LE-3. Latossolo Vermelho-Escuro Álico, A moderado, textura argilosa ou muito argilosa. Unidade Santo Antônio.

LV-5. Latossolo Vermelho-Amarelo Álico, A moderado, textura argilosa. Unidade Mato Dentro.

LV-7. Latossolo Vermelho-Amarelo, Álico, A húmico, textura média ou argilosa. Unidade Camarginho.

##### ARGISSOLOS

PE. Grupamento indiscriminado de Podzólicos Vermelho-Escuros, textura argilosa ou argilosa/muito argilosa com ou sem cascalho. Unidade Campestre.

#### OBSERVAÇÕES

1. Grupamento indiscriminado é o nome dado a uma unidade de mapeamento constituída por várias classes de solos de uma determinada ordem as quais, por motivos diversos, não foram discriminadas em níveis categóricos mais baixos.
2. LE-2 + LE-3, LE-3 + PE e PE + LE-3 representam unidades de mapeamento com mais de uma unidade taxonômica simples ou grupamentos indiscriminados colocados em ordem decrescente de ocorrência e pelo sinal de +.

Figura C-2. Mapa de solos da Microbasia Hidrográfica do Ribeirão Guamium.

A MHRG possui sete unidades de mapeamento sendo duas compostas por grupamentos indiscriminados de solos (G-1 e G-2), duas compostas por uma única unidade taxonômica simples (LV-5 e LV-7), uma composta por duas unidades taxonômicas simples (LE-2 + LE-3) e duas compostas por uma unidade taxonômica simples e por um grupamento indiscriminado (LE-3 + PE e PE + LE-3), como pode ser observado na Figura C2. Nesta mesma figura é apresentada a legenda expandida com a classificação pedológica de cada unidade taxonômica simples e grupamentos indiscriminados, os quais foram agrupados ao nível de ordem segundo o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006).

## Classificação hidrológica dos solos da MHRG

Os solos MHRG foram classificados hidrológicamente segundo os critérios da classificação hidrológica de solos proposta neste trabalho. Na Figura C-3 é apresentado o mapa de grupos hidrológicos de solos para a MHRG e na seqüência são registrados comentários sobre a classificação desses solos.

### Gleissolos

Na MHRG ocorrem dois grupamentos indiscriminados de Gleissolos, um denominado de Gleis Pouco Húmicos e outro de Gleis Húmicos. Os solos desses grupamentos são hidromórficos, com horizonte glei (não simultâneo com horizonte B textural) em seqüência ao horizonte A moderado nos Gleis Pouco Húmicos e ao horizonte turfoso ou A proeminente nos Gleis Húmicos. Esses solos ocorrem em planícies aluviais, com horizonte glei dentro de 50 cm de profundidade (OLIVEIRA, 1999). Como a presença desse horizonte é indicativa do lençol subterrâneo, o critério 19 da classificação proposta se aplica neste caso. Portanto, os grupamentos indiscriminados G-1 e G-2 são classificados no grupo hidrológico de solos D.

### Latossolos

Na MHRG ocorrem quatro classes de Latossolos, sendo duas de Latossolo Vermelho-Escuro e duas de Latossolo Vermelho-Amarelo. A característica comum destes solos é não apresentar camada restritiva dentro de 100 cm de profundidade.

Os Latossolos Vermelho-Escuros pertencem as Unidades Santo Antônio e Limeira. A diferença entre elas, apontada por Oliveira (1999), é a presença de estrutura subangular moderada no topo do horizonte B nos solos da Unidade Santo Antônio. Em geral esses solos possuem textura argilosa ou muito argilosa ao longo do perfil, teor de areia grossa inferior a 20%, teor de areia fina inferior a 30% e baixo teor de óxidos de ferro. Também apresentam baixa atividade da fração argila e não possuem propriedades ácricas. Assim, as características desses solos satisfazem o critério 12 da classificação hidrológica proposta, portanto são classificados no grupo hidrológico de solos B.

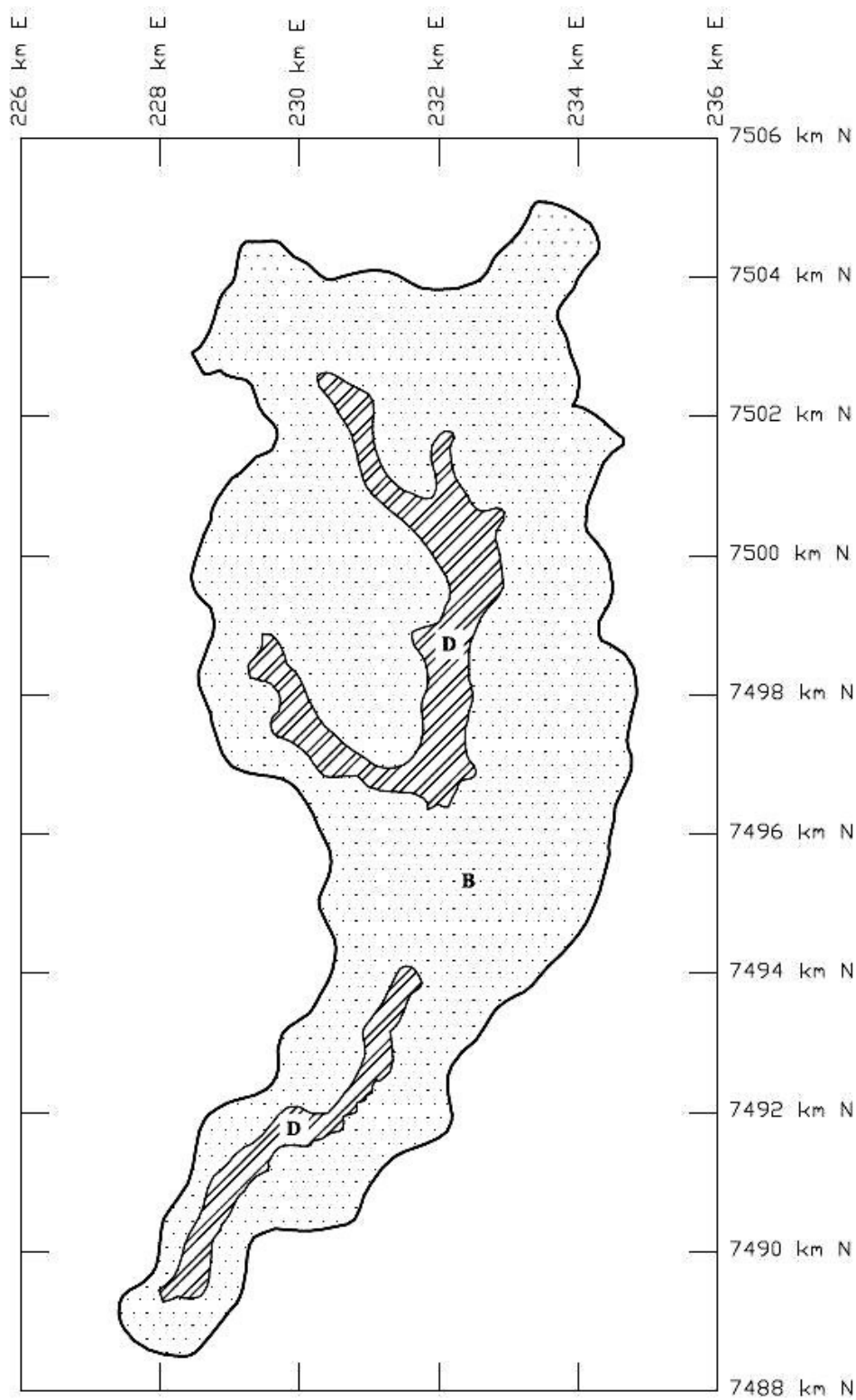
Os Latossolos Vermelho-Amarelos da Unidade Mato Dentro são de textura argilosa e os da Unidade Camarguinho são predominantemente de textura argilosa. Ambos são solos de baixo teor de óxidos de ferro e friáveis (Oliveira, 1999). Estes solos se enquadram no critério 12 da classificação hidrológica proposta, portanto são classificados no grupo hidrológico de solos B.

#### Argissolos

Dos solos da ordem dos Argissolos apenas um grupamento indiscriminado de Podzólicos Vermelho-Escuros ocorre na bacia. Segundo Oliveira (1999) os Podzólicos da Unidade Campestre apresentam textura argilosa ao longo do perfil, cores vermelho vivo, atividade baixa da fração argila e razão textural relativamente baixa, em geral inferior a 1,2. Também não registro da ocorrência de camadas restritivas dentro de 100 cm de profundidade. Assim, o grupamento indiscriminado PE se enquadra no critério 10 da classificação hidrológica proposta, portanto é classificado no grupo hidrológico de solos B.

#### Unidades de Mapeamento

Conforme apresentado, as unidades de mapeamento G-1 e G-2 ficam classificadas hidrológicamente como D e as unidades de mapeamento LE-2 + LE-3, LE-3 + PE, LV-5, LV-7 e PE + LE-3 ficam classificadas hidrológicamente como B. O mapa de grupos hidrológicos da Microbacia do Ribeirão Guamium é apresentado na Figura C-3.



Projeção: UTM; MC = 45° W, Gr.  
 Datum horizontal: Córrego Alegre, MG.

Figura C-3. Mapa de Grupos Hidrológicos de Solos da Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Guamium.

## Referências Citadas

- CAMARGO, M. N; KLANT, E; KAUFFMAN, J. H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.1, p.11-33, 1987.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.<sup>a</sup> Ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- OLIVEIRA, J. B. **Solos da folha de Piracicaba**. Campinas, Instituto Agrônômico, 1999. 173p. (Boletim Científico n.º 48).
- OLIVEIRA, J. B; PRADO, H. **Carta Pedológica semidetalhada do Estado de São Paulo: Folha de Piracicaba**. São Paulo, Secretaria da Agricultura/CPC/IA; Secretaria de Economia e Planejamento/CAR/IGC. 1989, Mapa, escala 1:100.000.