

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR DE
CURVAS-CHAVE**

ANDRÉ LUIZ SEFIONE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, Janeiro de 2002

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Professor Joel Avruch Goldenfum da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com o apoio do CNPq, uma entidade do governo brasileiro voltada ao desenvolvimento científico e tecnológico.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, professor e amigo Joel Avruch Goldenfum e ao amigo e pesquisador Adolfo Villanueva, pela paciência e experiência inestimáveis.

Aos amigos Omar Barbosa, Vladimir Caramori e Joana D'Arc Medeiros, pelo apoio na reta final.

Ao Professor Tucci, pelas sugestões valiosas.

Aos amigos e profissionais em hidrologia: Paulo Edson Marques, Andréa Germano, Lawson Beltrame, Fernando Martins, Jorge Sarobe e Tiago Baldasso.

Aos amigos: Sandra, Gabriel, Renato, Helena, Marina, Stela, Pati e Xande, pelo apoio, paciência e incentivo. Nosso Porto Seguro, nesse Porto Alegre.

A todos os colegas de turma em especial a Paulo R. de Araujo, Roberval Leone, Sérgio Torres, Ana Paula da Silva, Kathe Smith, Daniela Bemfica, Cleuda Freire, João Viegas, Marco Hansen, Flávio Tröger, Beatriz Stoll e Carlos Weiller. Além de Stela Cota, Roberto Kirchheim, Alexandra Finotti, Elisa Chaves, Sidnei Agra, Karina Agra, Walter Vianna Jr., Cristiana Vianna, Alex Gama, Jorge Pilar, Jaildo Pereira, Marcus Cruz, Walter Collischonn, Mario Mendiondo, Ane de Oliveira, Jean Nascimento, Luciane de Souza, Conceição de Oliveira e André Mito.

Às bibliotecárias Jussara Silva, Jussara Barbieri e Elizabete Freire, e a nossa querida secretária Nadir Solari, exemplos incontestáveis de competência, dedicação e boa vontade numa instituição pública e gratuita.

E finalmente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, seus professores, seus funcionários e pesquisadores, uma prova de competência, capacidade e tenacidade do povo gaúcho, que aprendi a admirar e respeitar.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Cláudio e Lucileide, que são a nascente do meu rio nesta vida, ao meu avô Dionísio (in memoriam) que me mostrou a beleza das águas e à Célia, minha querida e amada esposa, que é o oceano para onde, cedo ou tarde, sempre volto.

RESUMO

A busca de maior precisão nos dados hidrológicos é de fundamental importância no sentido de minimizar as incertezas inerentes aos mesmos e, conseqüentemente, aos estudos e projetos que os têm como base. A curva-chave, ferramenta importante na conversão de dados de cota em vazão, carece de estudos no sentido de aumentar a confiabilidade na sua calibragem e principalmente na sua extrapolação inferior e superior.

O objetivo deste trabalho é avaliar os métodos tradicionais de extrapolação superior da curva-chave, a saber: *Stevens*, *Logarítmico*, *Manning* e *Velocidade-Área*, além de duas variações propostas para os dois últimos (*Manning Log* e *VxA Log*). Para tal foram utilizadas 100 estações fluviométricas, a partir de uma metodologia proposta e denominada de *Pseudo-Extrapolação*. Nesta metodologia, suprimem-se as medições na metade superior da faixa de cotas medidas e extrapola-se a curva-chave nesta faixa utilizando-se os métodos escolhidos. As vazões geradas nesta 'extrapolação' são comparadas com as da curva-chave calibrada para o total das medições.

Os resultados mostraram que a metodologia de *pseudo-extrapolação* proposta é uma ferramenta válida para comparação entre métodos de extrapolação, até onde as características da seção transversal na faixa extrapolada sejam semelhantes às da faixa de pseudo-extrapolação.

Em relação aos métodos de extrapolação avaliados verificou-se que os métodos de *Stevens* e *Manning Log* mostraram resultados ligeiramente melhores que os demais e o método Logarítmico, apesar da inconstância nos erros calculados, mostrou-se como uma opção que deve ser admitida num estudo de extrapolação de curvas-chave.

Além disso, as variações propostas, *Manning Log* e *VxA Log*, apresentaram resultados que merecem uma investigação mais profunda.

ABSTRACT

The search for greater precision in hydrological data is of basic importance for minimising uncertainties both in the data themselves and in studies and projects that use them. The rating curve, an important tool for converting water level data to discharge, has received little attention directed at increasing the reliability of its calibration, and in particular its extrapolation to high flows.

The main objective of this study is to analyse traditional methods for extrapolating the upper end of the rating curve, namely *Stevens*, *Logarithmic*, *Manning* and *Velocity-Area*, together with two variations of the latter two methods (here called *Manning Log* and *VxA Log*). A hundred gauging stations were used in this study, following the *Pseudo-extrapolation methodology*, here developed. This new methodology consists of the suppressing the upper half of the measured levels in a gauging station, followed by fitting a rating curve to the remaining data and extrapolating this curve over the suppressed range, using each of the extrapolation methods. The discharges estimated by these procedures are then compared with those of a rating curve fitted to the whole data range.

The results obtained showed that the *Pseudo-extrapolation methodology* is a valid tool for the comparison of rating curve extrapolating methods, since the channel sections characteristics in the extrapolated zone are similar to those of the pseudo-extrapolation range.

Extrapolation using the *Stevens* and *Manning Log* procedures gave slightly better results than the other methods. However, although the computed error statistics given by the *Logarithmic* method were variable, it is an alternative that cannot be neglected in a rating curve extrapolation study.

Finally, the modified traditional methods *Manning Log* and *VxA Log* for extrapolating the upper end of the rating curve, yielded results suggesting that more detailed studies would be worthwhile.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	II
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 - JUSTIFICATIVA	1
1.2 - OBJETIVOS	2
CAPÍTULO II - CURVAS-CHAVE.....	3
2.1 - CONCEITO E REPRESENTAÇÃO DA CURVA-CHAVE	3
2.2 - CONSTRUÇÃO DA CURVA-CHAVE	4
2.3 – MEDIÇÕES DE VAZÃO.	7
2.4 - GEOMETRIA, RUGOSIDADE E MOBILIDADE DO LEITO.....	11
2.5 - CONTROLE HIDRÁULICO	14
2.6 - SENSIBILIDADE E ESTABILIDADE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	16
2.7 - TRAÇADO E CALIBRAGEM DA CURVA-CHAVE.....	17
2.8- O PROBLEMA DO “LAÇO” NAS CURVAS-CHAVE.....	20
2.9 – TRANSFERÊNCIA DE CURVA-CHAVE.....	22
CAPÍTULO III - MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR DE CURVAS-CHAVE ..25	
3.1 – METODOLOGIAS TRADICIONAIS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR	26
3.1.1 - Método Logarítmico	26
3.1.2 - Método de Stevens.	27
3.1.3 - Método de Manning.....	28
3.1.4 – Método Velocidade x Área.....	30
3.1.5 – Outros métodos	32
3.2 – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO.....	34
3.3 – ESTUDOS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR DE CURVA-CHAVE.....	36

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA.....	42
4.1 – DADOS GERAIS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS.....	42
4.2 - SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS	42
4.3 – CALIBRAGEM DAS CURVAS-CHAVE	43
4.4 – ESCOLHA E CLASSIFICAÇÃO DO PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL	45
4.5 – METODOLOGIA DE PSEUDO-EXTRAPOLAÇÃO.....	48
4.5.1 – Método Logarítmico (LOG).....	49
4.5.2 – Método de Stevens (Stv).....	49
4.5.3 – Método de Manning (Man)	50
4.5.4 – Método de Velocidade x Área (VxA).....	51
4.6 – PROBLEMAS NA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS PROPOSTOS.	52
4.7 – O PROBLEMA DAS MÚLTIPLAS SEÇÕES DE MEDIÇÃO ($A_M CAL \times A_M MED$)	53
4.8 – CRITÉRIO DE COMPARAÇÃO.....	55
4.9 – CRITÉRIO DE COMPARAÇÃO.....	56
4.9.1 - Erro na Cota Máxima (Eh_{max}).....	56
4.9.2 - Erro Médio (Em)	57
CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 - JUSTIFICATIVA PARA UTILIZAÇÃO DA $A_M CAL$	58
5.2 – APLICABILIDADE DOS MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO PROPOSTOS.....	61
5.3 – ESTIMATIVA DA VAZÃO NA COTA MÁXIMA.....	62
5.4 – CATEGORIZAÇÃO DE EH_{MAX} E EM NA FORMA PERCENTUAL.	65
5.4.1 – Análise do total das estações	65
5.4.2 – Seções padrão do tipo SG.....	68
5.4.3 – Seções padrão do tipo SC	71
5.4.4 – Seções padrão do tipo SS.....	73
5.4.5 – Seções padrão do tipo SE.....	75
5.5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS POR MÉTODO DE EXTRAPOLAÇÃO	77
5.5.1 – Método de Stevens.....	77
5.5.2 – Métodos: Manning Fix e Manning Log	77
5.5.3 – Métodos: VxA e VxA Log.....	78
5.5.4 – Método Logarítmico.....	78
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
6.1 – CONCLUSÕES.....	80
6.2 – RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES.....	81
6.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	82

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS.....	A1
Anexo A - Dados Gerais das Estações Fluviométricas Utilizadas	A2
Anexo B - Avaliação de A_mCal e A_mMed	A8
Anexo C- Valores calculados de Eh_{max} e Em das Estações Analisadas	A24
Anexo D- Curvas-chave das Estações Fluviométricas Utilizadas.....	A30

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Especificações para uso do Método Detalhado.	10
Tabela 2.2 - Valores experimentais de rugosidade em canais.	13
Tabela 3.1 – Resultado das extrapolações superiores da estação Salto Caxias.	38
Tabela 4.1 – Exemplo dos dados das medições de vazão preparados para cada estação.	44
Tabela 4.2 – Ferramentas de calibragem das curvas-chave.	45
Tabela 5.1 – Valores médios de Eh_{max} das 14 estações, para comparar A_m Med e A_m Cal.	59
Tabela 5.2 - Valores médios de Em das 14 estações, para comparar A_m Med e A_m Cal.	60
Tabela 5.3 – Número de estações onde não se aplicou os métodos de extrapolação (<i>falhas</i>).	61
Tabela 5.4 – Valores médios de R^2 dos gráficos de apoio por método.	62
Tabela 5.5 – Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e médias de Em por método.	62
Tabela 5.6 - Estimativa de Q_{C_m} por método de extrapolação do total das estações.	63
Tabela 5.7 - Estimativa de Q_{C_m} por método de extrapolação e por seções padrão.	64
Tabela 5.8 – Categorias adotadas para as diferenças Eh_{max} e Em	65
Tabela 5.9 – Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em do total (100 estações).	66
Tabela 5.10 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SG (36 estações).	68
Tabela 5.11 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SG. ...	69
Tabela 5.12 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SC (22 estações).	71
Tabela 5.13 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SC.	71
Tabela 5.14 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SS (28 estações).	73
Tabela 5.15 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SS.	73
Tabela 5.16 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SE (14 estações).	75
Tabela 5.17 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SE.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo da representação gráfica de uma curva-chave.....	3
Figura 2.2 - Exemplo da obtenção do fluviograma através do cotograma e da curva-chave.	6
Figura 2.3 – Ilustração do método da Meia Seção.	10
Figura 2.4 - Efeito da mobilidade da seção sobre a curva-chave.	14
Figura 2.5 - Perfil longitudinal e controles variáveis de vazão (adaptado de Fill, 1987).....	16
Figura 2.6 - Sensibilidade da estação fluviométrica (adaptado de Sanches, 2000).....	17
Figura 2.7 - Tipos de curva de calibragem. (Fonte: Jaccon e Cudo, 1989).....	19
Figura 2.8 – Curva-chave em Laço. (Fonte: Fill, 1987).....	20
Figura 2.9 – Superfície de calibragem da estação Passo das Canoas no rio Gravataí.....	21
Figura 2.10 - Resultados de transferência de curva-chave por Muller et al. (1997).	24
Figura 3.1 - Exemplo gráfico de extrapolação superior e inferior de curva-chave.	25
Figura 3.2 - Extrapolação pelo método de Stevens (adaptado de Jaccon e Cudo, 1989).....	28
Figura 3.3- Exemplo da extrapolação de K_m no método de Manning.....	29
Figura 3.4 - Efeito da vegetação sobre K_m num curso d'água.	29
Figura 3.5 - Variação da velocidade média em função das cotas e respectiva extrapolação. ...	30
Figura 3.6 - Seções com extravasamento da calha menor do rio.	31
Figura 3.7 – Vazão específica contra fatores fisiográficos (adaptado de Gomes et al., 2001). 35	
Figura 3.8 – Representação esquemática do cálculo de R_h (adaptado de Gomes, 1997).....	37
Figura 3.9 – Extrapolações superiores da curva-chave de Salto Caxias.	38
Figura 3.10 - Curva-chave da estação União da Vitória, rio Iguaçu (adaptado de Fill, 1987). 39	
Figura 3.11 – Curva-chave da estação Caramujo no rio Trombetas.	40
Figura 4.1– Bacias nº 7 e 8. (Fonte: www.aneel.gov.br).....	43
Figura 4.2– Gráfico do perfil da seção transversal da estação Passo do Prata no rio da Prata. 46	
Figura 4.3 – Exemplo esquemático dos padrões de seção transversal adotados.	47
Figura 4.4 - Exemplos do método Logarítmico na extrapolação da curva-chave.	49
Figura 4.5 - Exemplos da obtenção de $Q=f(A_m R_h^{1/2})$ no método de Stevens.	50
Figura 4.6 – Exemplos da obtenção de $K_m=f(H)$ no método Manning-Log.	51
Figura 4.7 – Exemplo da obtenção de $V=f(H)$ pelo método da Velocidade x Área.....	52
Figura 4.8 – Exemplos de gráficos de apoio com forte dispersão.....	52
Figura 4.9 - Exemplo da influência de R_h nos métodos de Stevens e Manning (Fix e Log)....	53
Figura 4.10 – $A_m R_h^{1/2}$ a partir de A_m medida em campo (esquerdo) e A_m calculada (direito). 54	
Figura 4.11– K_m a partir de A_m medido (esquerdo) e K_m a partir de A_m calculado (direito). ..	54
Figura 4.12 – Velocidade medida em campo (esquerdo) e velocidade calculada (direito).....	54

Figura 4.13 – Exemplo de descontinuidade entre curva-chave e pseudo-extrapolação.	56
Figura 4.14 - Gráfico esquemático das diferenças entre as vazões.	57
Figura 5.1– Histogramas de Eh_{max} das estações escolhidas para comparar $A_m Med$ e $A_m Cal$	59
Figura 5.2 - Histogramas de Em das estações escolhidas para comparar $A_m Med$ e $A_m Cal$	60
Figura 5.3 – Histogramas dos valores médios de Eh_{max} do total das estações por método.	63
Figura 5.4 – Histogramas percentuais de Eh_{max} e Em , para todas as estações por método.	67
Figura 5.5 – Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SG.	70
Figura 5.6 – Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SC.	72
Figura 5.7 – Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SS.	74
Figura 5.8– Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SE.	76

LISTA DE SÍMBOLOS

η	coeficiente de rugosidade de Manning
ΔH	variação da cota
ΔQ	variação da vazão
a, a_1, a_2, \dots, a_n	coeficientes de equações matemáticas
A_d	área de drenagem contribuinte até uma dada seção do rio (km^2)
a_m	constante da equação do molinete
A_m	área da seção transversal até o nível d'água ou área molhada (m^2)
$A_m \text{Cal}$	área molhada da seção do rio calculada por rotina Fortran
$A_m \text{Med}$	área molhada da seção do rio medida em campo
b	constante de velocidade de atrito do molinete
C	coeficiente da equação de Chezy (equação 3.2)
Eh_{max}	diferença na estimativa da vazão na cota máxima medida
Em	diferença média da estimativa da vazão na faixa de pseudo-extrapolação
H	cota em cm
H_o	cota referente a vazão nula (cm)
I	declividade do fundo do leito do rio no trecho hidrométrico (m/m)
i	Declividade da linha de carga (m/m)
J	declividade da linha d'água
K	coeficiente de rugosidade de Strickler.
K_m	coeficiente do método de Manning (equação 3.4)
LOG	método de extrapolação Logarítmico
Man Fix	método de extrapolação superior por Manning com K_m fixo
Man Log	método de extrapolação superior por Manning Logarítmico
n	expoente de equações matemáticas
n_0	número de rotações por segundo do molinete
Nh	número de vazões ou cotas calculadas na faixa de pseudo-extrapolação
p	profundidade do molinete na medição da velocidade do escoamento (cm).
P_m	perímetro molhado (m).

Q	vazão em m^3/s
Q_{c_h}	vazão da curva-chave numa dada cota.
Q_{c_m}	vazão da curva-chave na cota máxima medida
Q_{e_h}	vazão pseudo-extrapolada numa dada cota
Q_{e_m}	vazão pseudo-extrapolada na cota máxima medida
Q_{esp}	vazão específica em $l/s/km^2$
Q_i	Vazão na vertical i do método da Meia Seção
R_h	Raio hidráulico (m)
S_1, S_2, \dots, S_n	denominação dada às seções de medição numa mesma estação
SC	denominação para seções transversais com perfil complexo
SE	denominação para seções transversais com extravasamento do leito menor
SG	denominação para seções transversais com uma singularidade no perfil
SS	denominação para seções transversais com perfil simples
Stv	método de extrapolação superior por Stevens
V	velocidade do escoamento em m/s
V_i	vertical i do método da Meia Seção
$V \times A$	método de extrapolação superior Velocidade-Área
VXA Log	método de extrapolação superior Velocidade-Área Logarítmico

Capítulo I - Introdução

1.1 - Justificativa

Em todas as áreas da ciência é de suma importância a confiabilidade sobre os dados de onde os pesquisadores, após exaustivas análises, tiram suas conclusões que aos poucos vão dando corpo e corroborando idéias e hipóteses sobre os mais diversos assuntos.

Grande parte dos dados hidrológicos possui uma forte incerteza pelo fato de lidar com fenômenos naturais de extrema complexidade, no campo da mecânica fluvial, da dinâmica das águas subterrâneas e da própria meteorologia.

A busca de maior precisão nos dados utilizados em hidrologia tem uma importância fundamental no sentido de minimizar incertezas, aumentando o grau de confiabilidade dos estudos hidrológicos, sejam estes utilizados na hidrologia como ciência, ou na hidrologia aplicada na busca mais imediata do nosso bem estar.

Qualquer estudo de disponibilidade hídrica de uma bacia ou região - seja para uso do setor hidroelétrico, agrícola, abastecimento de água, autodepuração de efluentes, cálculo de vertedouro, cálculo de calado para navegação, só para citar alguns - que faça uso de dados de vazão em cursos d'água, depende de uma curva-chave de boa qualidade.

A curva-chave é a ferramenta criada para a determinação dos valores de vazão a partir do nível d'água (cota) numa dada seção de um curso d'água. Dificuldades normais, tanto técnicas como operacionais, na medição das vazões para a determinação da curva-chave, muitas vezes impedem que se estenda a curva-chave tanto para as cotas mais baixas, como para as cotas mais altas registradas. Essa informação é necessária para se obter as vazões mínimas e máximas que são, não raro, o ponto chave de muitos estudos hidrológicos.

Dessa forma os profissionais da hidrologia desenvolveram métodos, uns mais, outros menos complexos, para se extrapolar a curva-chave a partir de informações ou parâmetros possíveis de se medir ou estimar, como declividade da linha d'água, geometria da seção transversal ou rugosidade do trecho hidrométrico.

Como a todo tipo de extrapolação tem-se uma incerteza associada, a importância do estudo dessas metodologias reside em se minimizar e determinar tais incertezas. No caso das extrapolações superiores, esse problema é mais sério, visto que estas, em geral, são sensivelmente maiores que as extrapolações inferiores, acarretando maiores incertezas e podendo comprometer seriamente os dados de vazão gerados na faixa extrapolada. Brusa e Clarke (1999) chamam a atenção para o risco de se assumir que as descargas máximas anuais estão livres de erros ou que os erros nessas vazões são independentes. É fácil perceber a

falácia dessas suposições, uma vez que essas vazões foram obtidas da mesma curva-chave, que pode estar superestimando ou subestimando as vazões na faixa de extrapolação superior.

1.2 - Objetivos

Diante do quadro apresentado anteriormente, esse trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa entre os métodos tradicionais de extrapolação superior de curvas-chave aplicadas a estações fluviométricas, classificadas segundo a geometria da seção transversal. Para tal, é proposta uma metodologia de comparação denominada de *Pseudo-extrapolação*. Buscou-se também estabelecer, dentro do possível, quais métodos analisados se adequam melhor às classes de seções definidas.

A opção por metodologias mais simples e tradicionais deve-se ao fato de que os dados fluviométricos disponíveis no país, até então, são insuficientes para a aplicação de metodologias mais sofisticadas para a extrapolação superior da curva-chave.

Foram utilizados, dados hidrológicos de 100 estações fluviométricas dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, fornecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), entidade governamental atualmente responsável por estas informações.

Capítulo II - Curvas-Chave

Este capítulo tem como meta conceituar e situar a ferramenta curva-chave dentro da hidrologia, sua função, representação, as etapas e problemas que envolvem sua construção, uma vez que se trata do objeto principal e motivador desse trabalho.

2.1 - Conceito e representação da curva-chave

Curva-chave é o termo usado na hidrologia para designar a relação entre a cota (nível d'água) e a vazão que escoa numa dada seção transversal de um curso d'água. Também conhecida como curva de calibragem, cota-vazão e cota-descarga, permite o cálculo indireto da vazão na referida seção a partir da leitura da cota num dado momento.

A curva-chave de uma seção pode ser representada de três formas: a forma gráfica, a equação matemática e a tabela de calibragem.

No primeiro caso da representação gráfica, tem-se os valores de cota (H) no eixo das ordenadas e os valores de vazão (Q) no eixo das abscissas. Essa é a forma usual utilizada pelos hidrólogos brasileiros (Figura 2.1). Eventualmente encontra-se na literatura a forma gráfica invertida, da escola francesa: vazão no eixo das ordenadas e as cotas no eixo das abscissas (Chevallier, 1997).

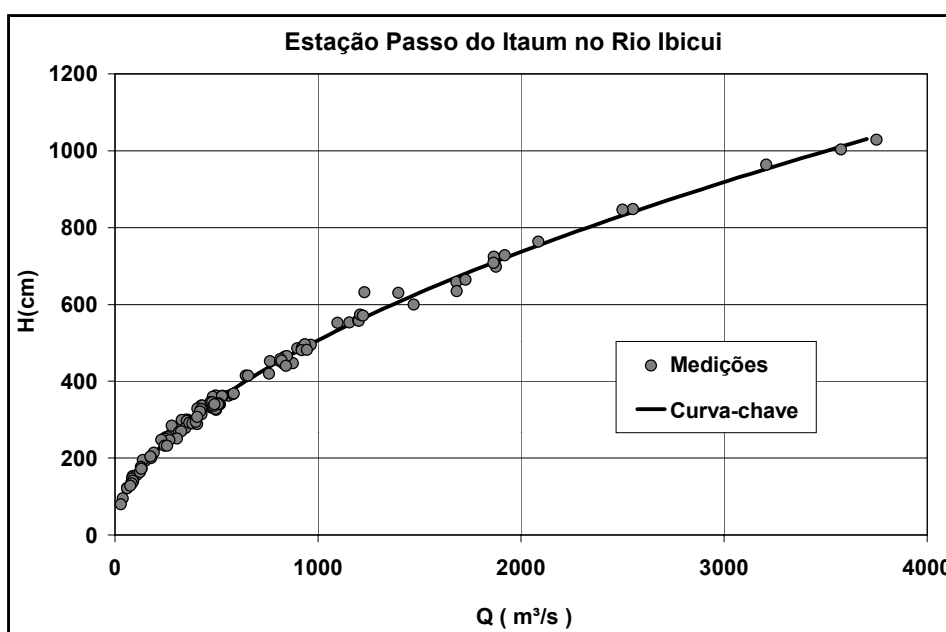


Figura 2.1 - Exemplo da representação gráfica de uma curva-chave.

A equação matemática, em contrapartida à forma gráfica, utiliza a vazão em função da cota. A explicação para essa aparente incoerência está no fato de que se habituou a representar as cotas no eixo vertical numa alusão à situação real de campo. São duas as formas de equações mais utilizadas.

A forma de potência:

$$Q = a (H - H_0)^n \quad 2.1$$

onde: a e n - coeficientes de ajuste para cada curva-chave

H - cota referente a uma vazão Q

H_0 - cota referente a vazão nula

e a forma polinomial dos tipos quadráticas e cúbicas:

$$Q = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_nH^n \quad 2.2$$

onde: a_0, a_1, a_2, a_n e n - coeficientes de ajuste para cada curva

H - cota referente a uma vazão Q

É comum ajustar mais de uma equação à curva-chave, por faixas de cota, visto que raramente uma única equação é capaz de representar a curva-chave em toda sua extensão.

Outra forma de apresentação é a Tabela de Calibragem, cujos valores são extraídos do gráfico da curva-chave ou da aplicação direta da(s) equação(ões) aos valores de cota. Trata-se de uma tabela onde se apresentam duas colunas, uma para os valores de cota e outra para os valores de vazão, e tantas linhas quanto necessárias para se obter a aproximação desejada da curva traçada. Os valores intermediários, em geral, são calculados por interpolação linear.

2.2 - Construção da curva-chave

Em geral, chega-se à curva-chave utilizando-se da representação gráfica e seguindo as etapas descritas a seguir:

- escolhe-se um local ao longo do curso d'água, através de uma série de critérios hidráulicos e logísticos, onde se deseja conhecer os valores de vazão. Aí se instala a estação fluviométrica, composta de réguas linimétricas e/ou linígrafos, permitindo o registro manual diário ou automático do nível de água no rio ao longo do tempo, que compõem a série histórica de **cotas observadas** da estação ou cotagrama;
- periodicamente faz-se medições diretas da vazão junto à estação. Associa-se a cada medida de vazão a cota referente, obtendo-se um ponto no gráfico $Q \times H$. Procura-se, dentro do possível, determinar esses valores de vazão para uma faixa de **cotas medidas** o mais ampla e contínua possível, obtendo-se um conjunto de pontos;

- traça-se então a curva de maior aderência aos pontos - calibragem da curva - manualmente, através de gabaritos (Fill, 1987), ou utilizando-se de programas ou planilhas computacionais, geralmente pelo método dos mínimos quadrados. No primeiro caso, do ajuste manual, tem-se a ***Tabela de Calibragem*** como produto final; no segundo caso, do ajuste computacional, pode-se dispor da(s) ***Equação(ões)***;
- por último convertem-se, através da curva-chave (tabela ou equação), os valores do cotograma para vazões, obtendo-se assim a série histórica de vazões da estação ou fluviograma, produto final do processo, como mostra a Figura 2.2.

É importante notar, como será melhor detalhado adiante, que geralmente a seção transversal do rio sofre alterações no seu perfil, devido a erosão, deposição de sedimentos, ação antrópica, vegetação, etc., o que forçosamente obriga a freqüentes ajustes na curva-chave apoiados em novas medidas de vazão, que devem ser feitas periodicamente.

Para efeito do presente trabalho utilizou-se a convenção adotada pelos hidrometristas e hidrólogos onde *cotas observadas* são aquelas registradas diariamente pelo observador da estação fluviométrica e *cotas medidas* são aquelas registradas pelo hidrometrista no momento da medição da vazão no rio, para a determinação da curva-chave.

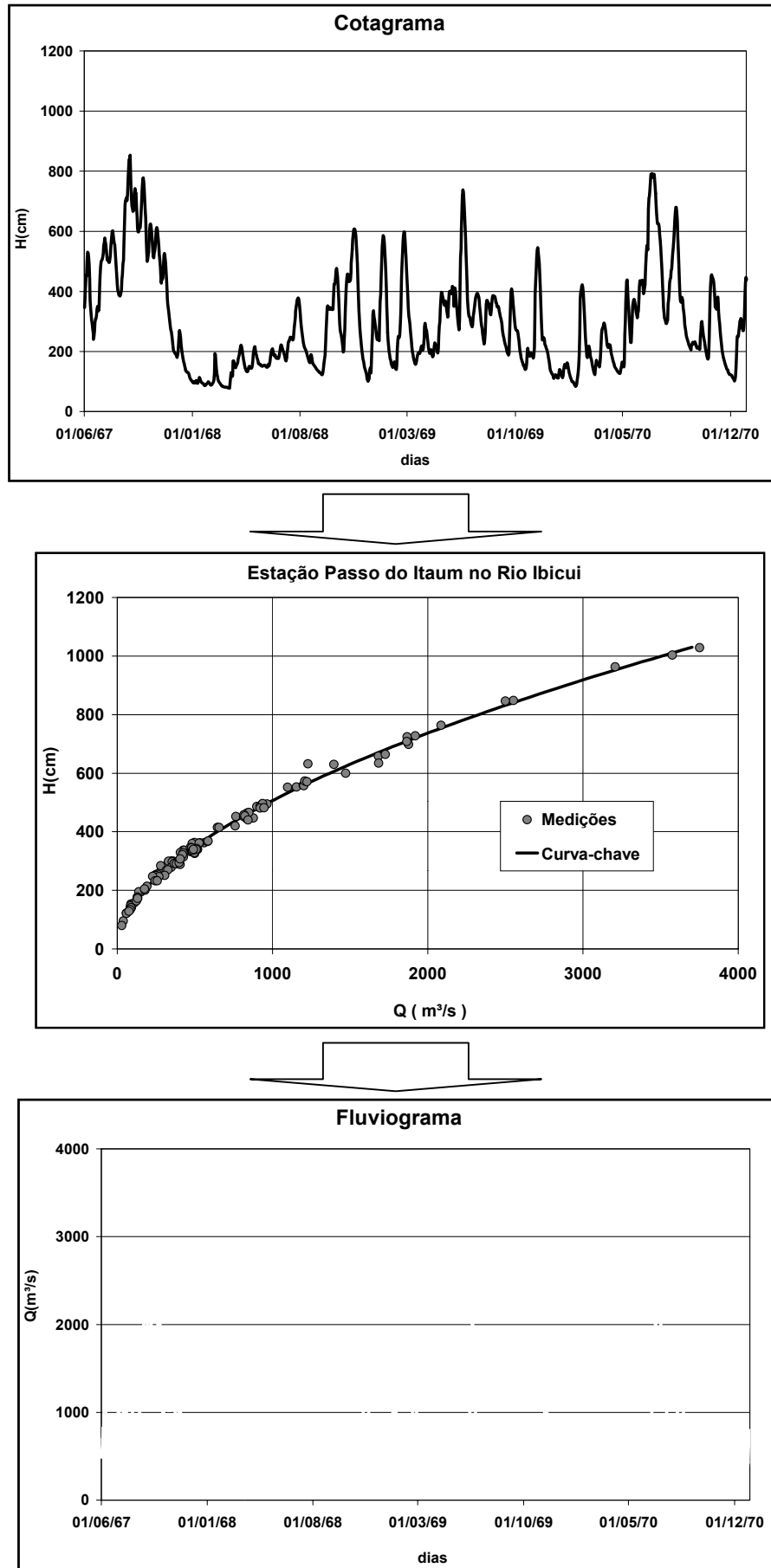


Figura 2.2 - Exemplo da obtenção do fluviograma através do cotograma e da curva-chave.

2.3 – Medições de Vazão.

Para se traçar uma curva-chave são necessárias, como já foi mencionado, medições de vazão feitas na maior amplitude de cotas que se possa alcançar e com a maior precisão possível, de forma a diminuir a faixa de cotas de extrapolação e ter-se maior confiança na calibração da curva. Existem vários métodos de medição de vazão, sendo uns mais precisos que outros e que muitas vezes não se adequam a qualquer situação.

A seguir, uma descrição breve das metodologias de medição e cálculo de vazão, tradicionalmente utilizadas pelos hidrometristas brasileiros.

A medição feita em barco com *Cabo Estendido* é uma das mais comuns e consiste em esticar um cabo de aço graduado, com diâmetro de 3/16" ou 1/4", entre as margens do rio, meio metro acima do nível d'água. Esse elemento irá permitir fixar o barco a uma distância desejada das margens, onde serão feitas as tomadas de velocidade com molinete.

O principal inconveniente de aplicação desse procedimento está em rios muito largos, acima de 300m, onde fica difícil fixar o cabo, dado às dificuldades normais que exigem tal tarefa; e também em rios com grande movimento de embarcações, que exigem que se solte o cabo, submergindo-o para dar passagem as embarcações, implicando em riscos e tempo extra. Para estas situações pode-se utilizar o *Barco Ancorado*, quando o arraste de materiais sólidos não põe em perigo essa tarefa. Esse método é um pouco mais trabalhoso no sentido de se posicionar o barco, exigindo uma equipe em terra e a instalação de balizas nas margens. Isso justifica também o fato de nesse método se ter as verticais não equidistantes e em menor número.

Quando há dificuldade de se ancorar o barco pode-se aplicar o *Método dos Grandes Rios*. Neste caso, as medições são feitas em dois pontos por vertical, deixando que o barco seja levado pela corrente num trecho perpendicular à seção transversal e cruzando a mesma. Uma equipe em terra, com teodolitos e cronômetro, determina a velocidade do barco, à medida que se mede com o molinete a velocidade do rio em relação ao barco, fazendo-se uma compensação. Esse método de medição é rápido e mais seguro, uma vez que é menor o perigo de choque com material flutuante. A precisão das medições depende, nesse caso, muito mais do rigor na execução do método. Deve-se buscar medir as velocidades em cada ponto, nos deslocamentos mais curtos possíveis, e sempre próximas da mesma seção de medição (Filizola et al.,1999).

Filizola et al. (1999) afirmam ainda, que a metodologia de medição com barco ancorado garante um erro inferior a 10%. Considerando que a técnica de medição com cabo estendido tende a ser mais precisa que aquelas feitas com barco ancorado, visto que se tem a

possibilidade de posicionar o barco em qualquer vertical com facilidade, detalhando melhor a seção, de forma que o erro nesse caso deve ser ainda menor.

Outro procedimento muito comum utilizado pelas equipes de hidrometristas são as medições feitas a partir de *Pontes*, que segundo Fill (1987), só dão bons resultados se a ponte não apresentar pilares intermediários, que alteram as velocidades medidas nas suas proximidades. Essas medições só se justificam nas cheias que apresentam real perigo para os hidrometristas (Brasil, 1977). Deve-se ter o cuidado de registrar a posição e as dimensões exatas de cada pilar, para que a obstrução da seção pelos pilares possa ser considerada no cálculo da vazão. Convém lembrar que essa tarefa de registro dos pilares é pouco efetivada na prática, e por comodidade são freqüentes as medições feitas dessa forma em águas normais, o que amplia a possibilidade de erros.

Embora ainda pouco difundido nos estudos hidrológicos brasileiros, dado ao seu custo, o método de medição de vazão mais rápido e preciso é o chamado *ADCP* (Acoustic Doppler Current Profiler) ou Perfilador Doppler-acustico de Corrente. O sistema baseia-se no envio de ondas sonoras através da água, que são refletidas pelas partículas de sedimentos e zooplânctons em suspensão levados pela corrente (Gordon, 1989 apud Santos et al., 1997). A freqüência das ondas (75, 300, 600 e 1200 KHz) refletidas sofre uma alteração em função do deslocamento das partículas (efeito Doppler) que permite o cálculo da sua velocidade e conseqüentemente da velocidade da corrente, além de permitir o cálculo da descarga sólida na seção. O equipamento trabalha submerso próximo a superfície e acoplado a um computador com programa próprio a bordo da embarcação. O cálculo da vazão é feito imediatamente após a travessia do curso d'água, uma vez que a batimetria e cálculo da área acontecem paralelamente.

Filizola et al. (1999) citam o caso do rio Solimões em Manacapuru, um trecho de rio com 3 km de largura, onde foram feitas em quatro dias, uma série de medições de vazão para um estudo comparativo entre o método com ADCP e outros métodos tradicionais para grandes rios. Enquanto pelo método do ADCP realizou-se uma média de 8 medições por dia os outros métodos proporcionaram uma única medição confiável.

Santos et al (1997), mencionam as medições feitas na estação de Salto Caxias, onde as condições desfavoráveis para medição com molinetes impedem a realização de medições de vazão, mas que no entanto, puderam ser realizadas pelo método ADCP, reduzindo a faixa de extrapolação da curva-chave.

Todos os métodos de medição de vazão anteriormente descritos, com exceção do ADCP, calculam a vazão a partir da medição da velocidade da água no rio e da aplicação da equação da continuidade para os fluidos, utilizando o molinete hidrométrico, um aparelho que

permite a determinação da velocidade da corrente d'água, medindo o tempo que sua hélice ou conchas, levam para dar um certo número de rotações. Cada molinete é aferido em laboratório para se estabelecer uma equação de calibragem da forma :

$$V = a_m \cdot n_0 + b \quad 2.3$$

Onde V é a velocidade do escoamento em m/s;

a_m é a constante do passo da hélice;

b é a constante de velocidade de atrito do molinete;

n_0 é o número de rotações por segundo.

Cada molinete possui em geral dois conjuntos de hélices, para velocidades altas e baixas e uma equação para cada hélice, limitada por um valor de n_0 . Não se deve utilizar o molinete para medir velocidades acima ou abaixo da sua especificação, implicando em erros e danos para o aparelho. Deve-se nesse caso trocar de hélice ou de molinete. Outro cuidado é registrar as velocidades para um número de rotações superior a 20, pois para um número menor de giros, uma falha na contagem de uma rotação resulta em erro superior a 5%. Outro erro possível é a troca da equação do molinete no procedimento do cálculo da velocidade, que em geral, é fácil de ser corrigido quando detectado.

O manual de Fluviometria do MME-DNAEE (Brasil, 1977), aconselha reafirmar o molinete em laboratório a cada 100 medições, pois o atrito normal do uso do aparelho altera as constantes da equação. Essa prática também é pouco efetivada, devido à escassez de laboratórios no país capacitados nessa tarefa, o que também implica em erros.

O método de cálculo da vazão total na seção transversal adotado pelo antigo DNAEE e utilizado até então é o método da *Meia Seção* (Oliveira, 1973), que consiste em dividir a seção transversal em uma série de verticais, segundo critério definido pelo DNAEE: mínimo de 25 verticais para rios com até 300 m de largura e acima de 40 verticais para rios com larguras maiores. Recomenda-se um adensamento maior de verticais, onde a velocidade é maior. Em cada vertical faz-se as medições de velocidade segundo os métodos *Detalhado* ou *Simplificado*, obtendo-se uma velocidade média para a vertical, como é mostrado a seguir. Essa velocidade é multiplicada pela área de influência da vertical correspondente, determinada como sendo o produto da profundidade da vertical pela soma das semi distâncias das verticais adjacentes, como mostra a Figura 2.3. A vazão total é a soma das vazões parciais e a velocidade média do rio na seção é o valor da vazão total dividido pela área da seção.

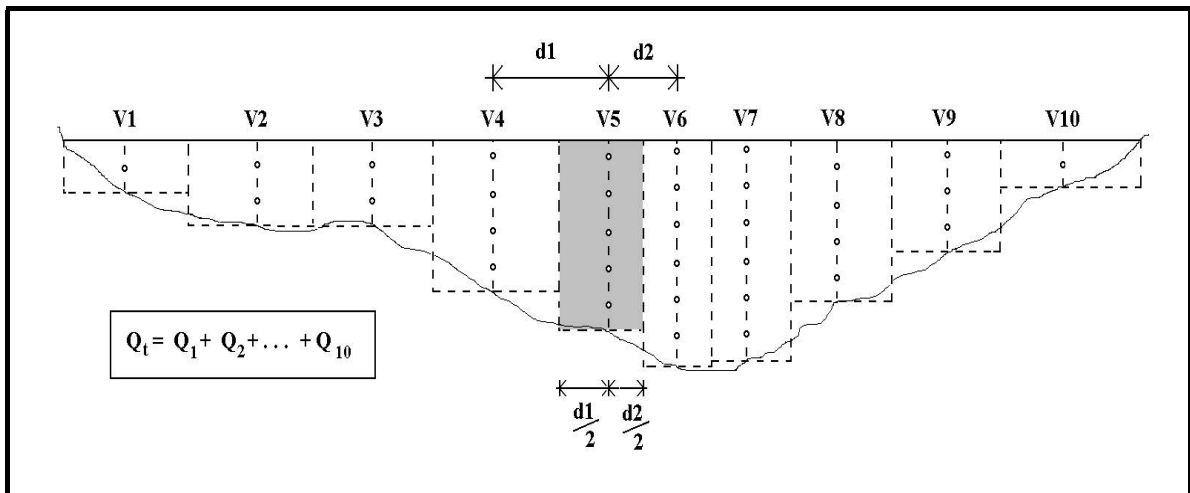


Figura 2.3 – Ilustração do método da Meia Seção.

Nota-se que, para um número razoável de verticais, existe uma compensação de áreas acima e abaixo do perímetro da seção, semelhante ao processo de integração diferencial, onde o resultado final é tão próximo da área total da seção quanto maior o número de verticais.

As metodologias adotadas para determinação das velocidades médias em cada vertical são duas: método detalhado e método simplificado. No método *Detalhado* faz-se de uma a seis tomadas de velocidade por vertical conforme a profundidade da lâmina d'água segundo a Tabela 2.1. No método *Simplificado* ou método dos *Dois Pontos* toma-se uma velocidade a 60% da superfície, para profundidades menores que 60 cm, e para profundidades maiores, dois pontos, um a 20% e outro a 80% da superfície. Segundo estudo de Parigot (1948) apud Fill (1987), o erro cometido pelo método dos dois pontos em relação ao método detalhado é inferior a 3%.

Tabela 2.1 – Especificações para uso do Método Detalhado.

Profund.(m)	Tomada de velocidade (p = profundidade)	Cálculo da Velocidade Média na Vertical
0,15 a 0,60	0,6p	$V = V_{0.6}$
0,60 a 1,20	0,2p/0,8p	$V = (V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8})/4$
1,20 a 2,00	0,2 p/0,4p/0,6p/0,8p	$V = (V_{0.2} + 2V_{0.4} + 2V_{0.6} + V_{0.8})/6$
2,00 a 4,00	Sup/0,2p/0,4p/0,6p/0,8p/Fun	$V = [V_s + 2(V_{0.2} + V_{0.4} + V_{0.6} + V_{0.8}) + V_f]/10$
Sup – Superfície = 0,10 m		Fun – Fundo = 0,15 a 0,25 m em função do lastro

(Fonte: Brasil, 1977).

Os erros totais na determinação da vazão, segundo Silveira (1974), no caso de uma medição bem executada, não devem ultrapassar os 5%, sendo 2% devido à determinação da distancia entre as margens e verticais; 2% devido à medição das profundidades e perfil transversal e 1% nas medições de velocidade.

Em casos críticos pode-se ter: 3% de erro relativo as medições das distâncias verticais no caso de rios largos (acima de 350m); 5% de erro devido à medição das profundidades para rios profundos e rápidos, se não são feitas as correções no ângulo vertical (arraste) - outra imprecisão possível deve-se a problemas no contato elétrico do molinete no fundo do leito.

Em relação à velocidade, não considerar um tempo mínimo na contagem das rotações, ou descuido na cronometragem, pode gerar erros de até 15%. Como a vazão é calculada pela equação da continuidade ($Q = A_m \cdot V$), e os limites de variação da velocidade são estreitos - 0,5 m/s a 2,0 m/s - conclui-se que a precisão na determinação da descarga depende essencialmente do cálculo da área ou seja das medições de largura e profundidade.

Silveira (1974) ainda enumera as principais causas de erro na determinação da vazão:

- medidas mal feitas da área da seção;
- número insuficiente e/ou má distribuição de verticais;
- desvio do molinete em relação à vertical;
- correntes inclinadas em relação à seção transversal de medição;
- embarcação se movimentando devido a vento ou turbulência no escoamento;
- regime de escoamento variável durante a medição - variação de nível não levada em conta;
- medidas de velocidade mal feitas, não considerando o tempo mínimo;
- molinete não aferido;
- número insuficiente de pontos por vertical.

Muitas dessas fontes de erros podem ser evitadas tomando-se as precauções devidas e outros erros podem ser corrigidos quando detectados, daí a insistência dos manuais e bibliografia referente para que o hidrometrista procure anotar todos os procedimentos nos seus mínimos detalhes, pois informações aparentemente insignificantes podem ser a chave para a solução de problemas aparentemente insolúveis, evitando que se percam dados, o que implica muitas vezes em gastos.

Finalmente, em termos gerais, o erro que se comete na determinação da vazão em cursos d'água natural são de 2%, em condições favoráveis; 15% em condições desfavoráveis, sem as precauções devidas e 5% em condições normais.

2.4 - Geometria, Rugosidade e Mobilidade do leito

A curva-chave depende de forma intrínseca das condições de escoamento no curso d'água. É necessário, portanto, que o hidrólogo conheça bem as características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho onde esta se localiza (Jacon e Cudo, 1989).

As características de escoamento num curso d'água dependem basicamente de dois fatores: geometria e rugosidade do leito. Além de se ter uma boa compreensão sobre esses parâmetros é fundamental conhecer a mobilidade do leito, ou seja, sua variabilidade no tempo e no espaço, permitindo assim constantes ajustes na curva-chave, por períodos e por cotas.

No aspecto **Geometria**, Jaccon e Cudo (1989) chamam a atenção, para as singularidades que podem interferir no traçado da curva-chave. Dividem este item em três aspectos:

- **Traçado** - diz respeito à forma em planta do rio, sendo mais ou menos meandrante ou sinuoso. Curvas mais fechadas, confluências e defluências são as singularidades no traçado que podem refletir sobre a curva;
- **Perfil longitudinal** - diz respeito à declividade do rio, reflexo da topografia da região. Os dois elementos fundamentais do perfil longitudinal são: declividade de fundo (I) e a declividade da linha d'água (J). Esses elementos são parâmetros importantes no estudo do escoamento no curso d'água. As singularidades no perfil longitudinal que podem interferir no traçado da curva-chave são as mudanças bruscas de declividade, sejam naturais ou artificiais, como por exemplo: barragens, vertedouros, soleiras, travessias submersíveis, etc.
- **Seção transversal** - no caso da curva-chave, a seção transversal considerada é aquela relativa às réguas linimétricas. Admite-se também, para efeito de simplificação, muito próxima da realidade, a seção transversal como sendo uma seção vertical e perpendicular às margens, o que a rigor não é verdade dado a inclinação do leito e a complexidade nas direções do escoamento (Jaccon e Cudo, 1989). Os dois parâmetros mais importantes neste caso são a Área Molhada (A_m) - calculada através de batimetria da seção - e o Raio Hidráulico (R_h), calculado pela equação:

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad 2.4$$

onde P_m é o perímetro molhado, comprimento da linha de contato entre a água e o leito numa dada seção transversal do curso d'água.

Outro fator determinante no escoamento é a **Rugosidade do Leito**, medida do quanto a superfície de contato do leito com a água proporciona a esta uma resistência ao fluxo. Essa resistência varia conforme a natureza, granulometria do material, a conformação do fundo do leito e a ocorrência de elementos singulares como vegetação, pedras, etc.

Uma forma comum de se expressar a rugosidade do leito é através do coeficiente de rugosidade de Manning. A equação empírica proposta por Robert Manning em 1889 foi a

princípio desenvolvida para canais artificiais em condições ideais tais como: trechos retilíneos, seção constante, baixa declividade, fundo horizontal (Porto, 1998). Utilizar o coeficiente de Manning em canais naturais implica numa simplificação que requer muito cuidado, visto que na natureza as condições são bem diferentes.

A partir da equação da velocidade de Chezy para escoamentos uniformes e utilizando o coeficiente de rugosidade de Manning (η) tem-se a equação abaixo:

$$V = \frac{1}{\eta} R_h^{2/3} J^{1/2} \quad 2.5$$

Onde: V- velocidade média do escoamento (m/s)

J - declividade da linha d'água (m/m)

R_h – raio hidráulico (m)

η - coeficiente de rugosidade de Manning

A equação original trata da declividade da linha de carga, que para efeito de simplificação é admitida igual à declividade do fundo e da linha d'água. Este é o caso de escoamentos uniformes, não ocorrendo em fundos horizontais ou ascendentes.

Outro coeficiente comumente utilizado para expressar a rugosidade de um canal ou curso d'água é o coeficiente de Strickler. Trata-se do inverso do coeficiente de Manning, como mostra a equação 2.6.

$$K = \frac{1}{\eta} \quad 2.6$$

A Tabela 2.2 mostra alguns valores de η e K obtidos experimentalmente.

Tabela 2.2 - Valores experimentais de rugosidade em canais.

Natureza do leito	η	$K = 1/\eta$
Revestimento de concreto	0,013 a 0,015	77 a 67
Leitos naturais limpos de fundo liso e horizontal	0,020	50
Leitos naturais limpos de fundo rugoso	0,030	33
Leitos naturais com vegetação	0,050 a 0,100	20 a 10

(Fonte: Jaccon e Cudo, 1989)

Nota-se que, à medida que aumenta a lâmina d'água, diminui a influência da rugosidade do leito sobre o escoamento, até que esta se anule, salvo as situações em que esta tendência é alterada principalmente pela presença da vegetação numa determinada faixa de cotas.

Vale lembrar que não é comum expressar unidades para os coeficientes de rugosidade de Manning e Strickler, embora, a rigor, não sejam adimensionais.

A **Mobilidade do Leito** diz respeito aos processos de erosão e deposição de sedimentos no trecho do posto fluviométrico e na seção linimétrica. Esse processo é mais acentuado em cursos d'água cujo leito é formado de materiais finos e pouco coesos, a exemplo dos solos arenosos, siltosos, areno-argilosos, etc. Algumas cheias podem escavar a seção ao passo que outras, de igual magnitude, causam deposição, não havendo uma lógica aparente ou de fácil explicação. Além dos processos naturais, a ação antrópica pode refletir em variações da curva-chave com o tempo. Fill (1987) cita o caso da estação de Araucária, no rio Iguaçu, onde foi impossível se estabelecer uma curva-chave aceitável, devido a grandes retiradas de areia próximo a estação.

Segundo Jacon e Cudo (1989), a mobilidade dos leitos naturais é um fenômeno geral que afeta grande parte das estações fluviométrica e, no entanto, desconsiderada pelos hidrólogos na escolha do local do posto. Esse fator é uma das principais dificuldades para determinação da curva-chave (Figura 2.4).

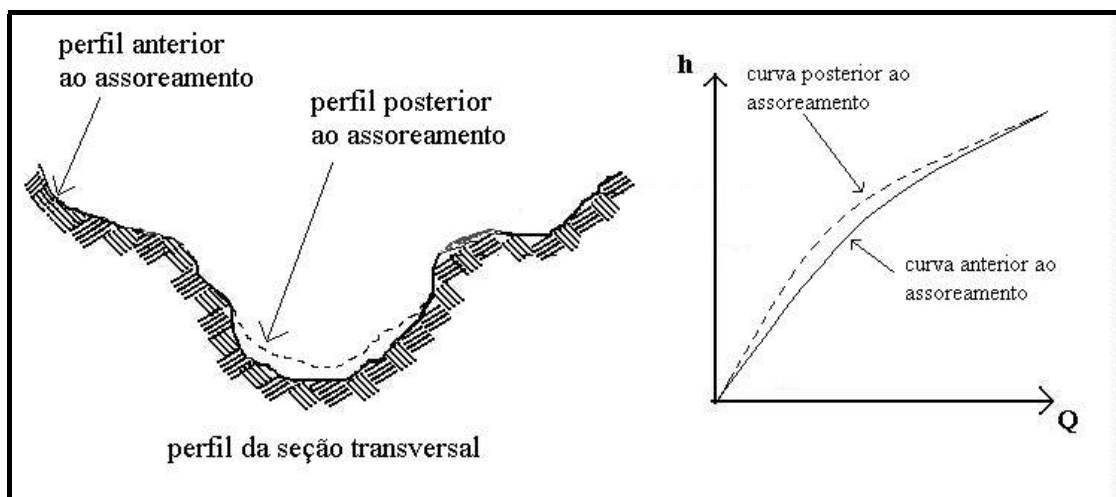


Figura 2.4 - Efeito da mobilidade da seção sobre a curva-chave.

2.5 - Controle Hidráulico

Ainda dentro das características de escoamento associadas à curva-chave, tem-se o chamado controle hidráulico, de fundamental importância no estudo e traçado da mesma. Segundo Jacon & Cudo (1989), o escoamento em uma seção linimétrica (seção de régua), está sob controle, quando

"as características geométricas são tais que o nível d'água é um parâmetro estável da descarga, ou em outras palavras, quando em um trecho de geometria invariável, tem-se sempre a mesma descarga para a mesma cota."

Supõe-se nesse caso que o regime de escoamento é **permanente** ou muito próximo deste.

Os controles podem ser de dois tipos:

- **Seção de controle** - quando ocorre uma singularidade no leito que provoca uma mudança de escoamento de *uniforme* ou quase uniforme para *variado*. Isso ocorre numa dada seção próxima ao controle, daí a denominação seção de controle. Essas singularidades podem ser naturais como: corredeiras, saltos e cascatas rochosas, mudanças bruscas de declividade, soleiras rochosas, etc., ou artificiais como: soleiras artificiais, calhas do tipo Parshall, etc. Nas seções de controle, tem-se ainda o chamado *controle completo*, onde o trecho a montante da seção de controle, ou *seção crítica* neste caso, não sofre nenhuma influência do trecho a jusante. Os saltos ou cascatas são um exemplo clássico de controle completo. Quando o controle não é completo é denominado de *controle parcial*, ou seja, o trecho a montante da seção de controle sofre influência parcial do trecho a jusante.
- **Controle de canal** - no caso de leitos naturais longe de singularidades, porém com perfil transversal regular e declividade e descarga, suficientes para caracterizar um escoamento uniforme ou bem próximo disso, tem-se o chamado controle de canal. Pode-se nesse caso utilizar a equação de **Manning** para descrever o escoamento no curso d'água.

Podem-se distinguir ainda duas situações em relação aos controles:

- **controle único** - quando para qualquer situação de vazão a seção crítica é sempre a mesma. Por exemplo: saltos e cascatas;
- **controle não único** - quando o aumento da vazão "afoga" sucessivamente os controles, em geral soleiras, podendo atingir em níveis mais altos um controle de canal. Esta é a situação mais comum (Figura 2.5).

Jaccon & Cudo (1989) afirmam que a qualidade fundamental de um bom controle é sua permanência no espaço, por sua eficácia em todas as descargas; e no tempo, pela estabilidade de suas características geométricas e hidráulicas.

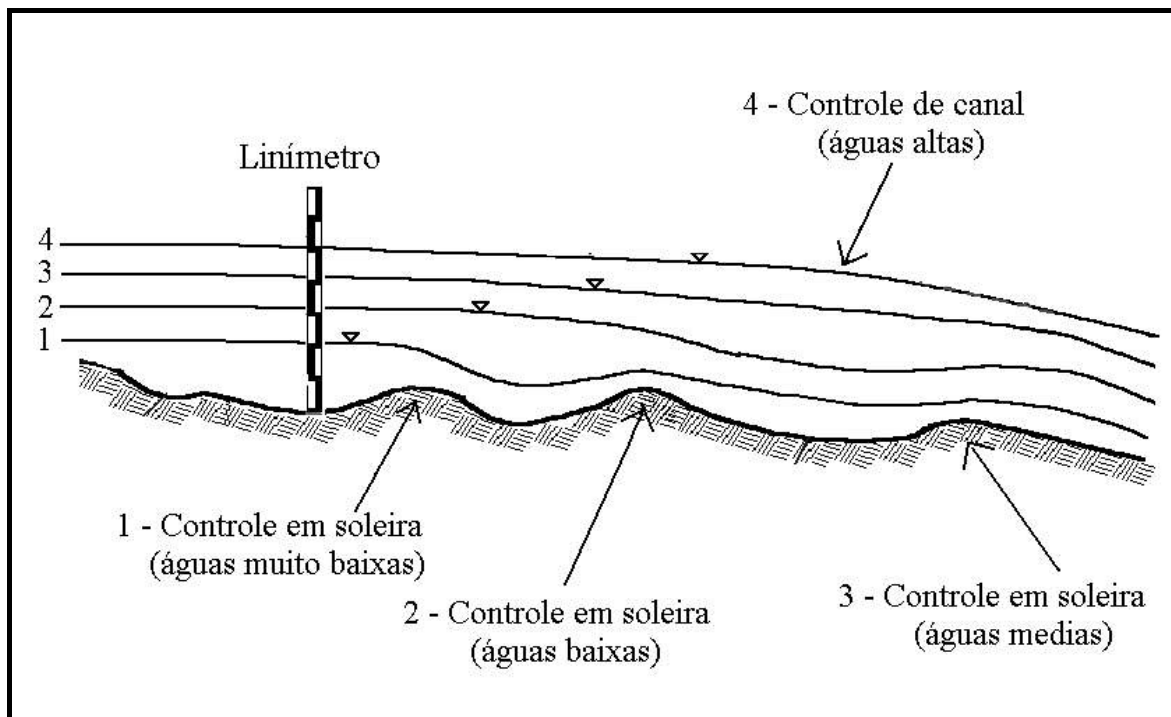


Figura 2.5 - Perfil longitudinal e controles variáveis de vazão (adaptado de Fill, 1987).

2.6 - Sensibilidade e Estabilidade da estação fluviométrica

Existem ainda dois aspectos importantes que devem ser considerados na análise e compreensão da curva-chave. São a sensibilidade e a estabilidade da curva-chave ou da estação fluviométrica.

A sensibilidade expressa a relação entre a variação de cota e a variação de vazão na seção ($\Delta Q/\Delta H$). Diz-se que uma seção é mais sensível quanto menor for a variação de vazão para uma grande variação de cota, o que ocorre em seções estreitas e profundas, e com escoamento lento (*regime fluvial*). A preferência por estações com seções mais sensíveis é devido ao fato de que os erros de leitura nas cotas significam variações menores nos valores de vazão calculados (Sanchez, 2000), como mostra a Figura 2.6.

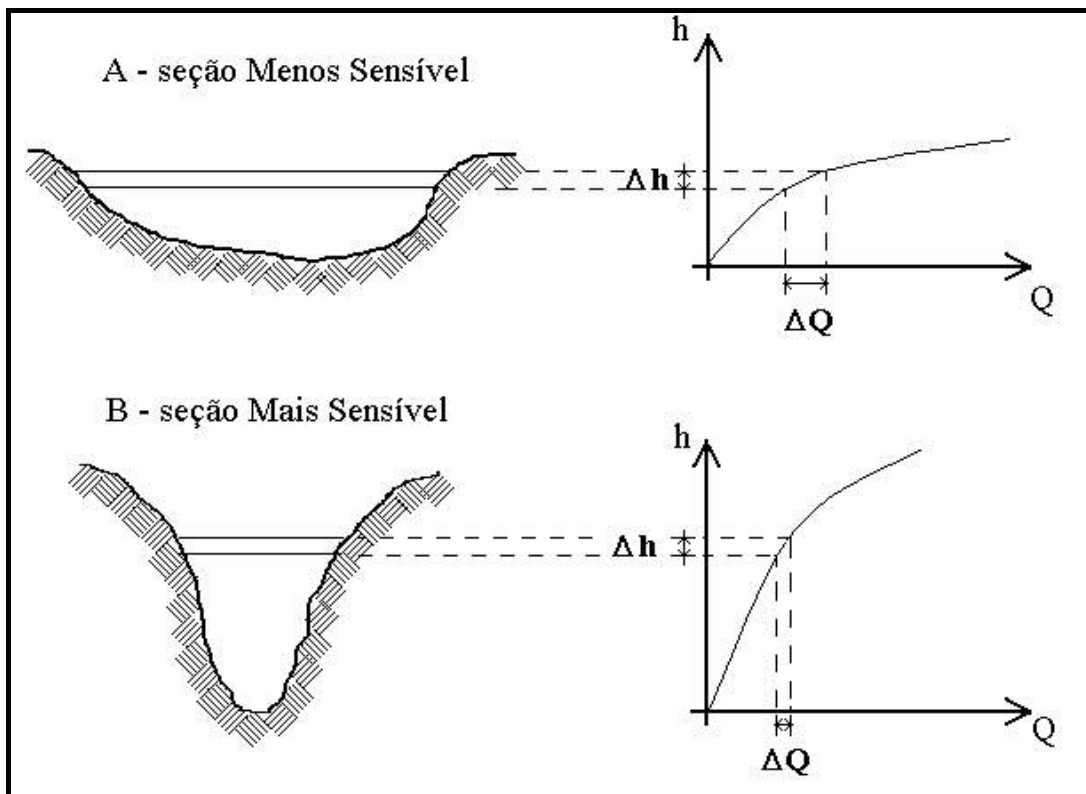


Figura 2.6 - Sensibilidade da estação fluviométrica (adaptado de Sanches, 2000).

A estabilidade de uma estação fluviométrica é reflexo da mobilidade do leito e da permanência do controle da seção limimétrica. Uma estação fluviométrica é tanto mais estável quanto menos variação possui sua curva-chave no decorrer do tempo e no crescer das cotas.

Obviamente há fatores outros que não são puramente hidrológicos, mas também logísticos, determinantes na escolha do local para uma estação fluviométrica, principalmente a facilidade de acesso e a existência de um observador próximo ao local (Brasil, 1977). A busca de um trecho estável e tanto mais sensível quanto possível deve ser uma constante para os hidrólogos.

2.7 - Traçado e calibragem da curva-chave

Calibrar uma curva-chave significa encontrar a função ou traçado que melhor se ajuste aos pares de pontos cota-vazão, obtidos das medições de vazão (Azevedo et al., 1994). Essa correspondência entre cota e vazão, na prática pode ser impossível de se determinar, seja pela grande instabilidade do trecho onde se encontra a estação fluviométrica, seja pelas condições hidráulicas desfavoráveis, como por exemplo o efeito de remanso. Não se trata, portanto, de um ajuste puramente matemático, essa tarefa requer uma análise de todos os fatores anteriormente mencionados: geometria, sensibilidade e estabilidade da seção transversal; rugosidade e mobilidade do leito e controle do trecho hidrométrico.

Jacon e Cudo (1987) propõem um roteiro para se determinar a curva-chave de uma estação, baseado na experiência dos autores com o assunto, e que será utilizado nesse trabalho para a calibragem das curvas-chave. A seguir tem-se cada etapa descrita de forma sucinta.

- Análise do dossiê ou histórico da estação - trata-se das informações sobre a localização do posto; área de drenagem; características e condições do trecho e dos equipamentos hidrométricos; seções de controle (se existir); levantamentos topográficos do trecho (transversal e longitudinal); etc. O propósito desta análise é ter uma idéia da estabilidade do trecho e determinação de períodos homogêneos.
- Levantamento de cotas e medições de descarga - recomenda-se separar as planilhas de medição de descarga originais, nos períodos homogêneos anteriormente fixados.
- Crítica das medições - reunir em tabela os seguintes dados: data da medição; cota; vazão; área molhada; velocidade média; largura; profundidade média. Convém analisar esses dados em duas tabelas, por ordem cronológica e por ordem crescente de cotas. Para cada medição dá-se uma nota de avaliação, comparando-se com as demais. A experiência mostra que num conjunto de medições sempre ocorrem algumas de péssima qualidade, que devem ser desconsideradas.
- Análise da repartição dos pontos - traça-se o gráfico dos pontos cota-vazão, e busca-se definir a qual dos esquemas da Figura 2.7 a curva-chave pertence. Outra análise feita sobre esse gráfico é em relação a possíveis desvios sistemáticos nas medições.
- Traçado da curva-chave - o traçado deve ser feito numa folha em grande escala, seja aritmética ou logarítmica, com base no gráfico anterior. Deve-se considerar uma igual repartição dos pontos, acima e abaixo da curva-chave, e a minimização dos desvios.
- Extrapolação - extrapola-se a curva até a máxima e mínima cota observada no histórico de cotas da estação (cotagrama). Quando as condições permitirem deve-se extrapolar a curva pelo maior número de métodos possíveis comparando-se os resultados.
- Tabela de calibragem - escolhe-se um número suficiente de pares que acompanhem o mais precisamente o traçado da curva. Pode-se em certos casos substituir a tabela por uma ou várias equações, não esquecendo que as equações podem ser menos precisas que a tabela, sobretudo quando o traçado for um pouco irregular.
- Relatório - sendo o traçado da curva-chave um trabalho de interpretação, tanto sobre o regime hidráulico como no traçado da própria curva, é importante um relatório sucinto comentando hipóteses, alternativas e decisões tomadas, permitindo uma continuidade na atualização da curva sem a necessidade de se refazer o trabalho.

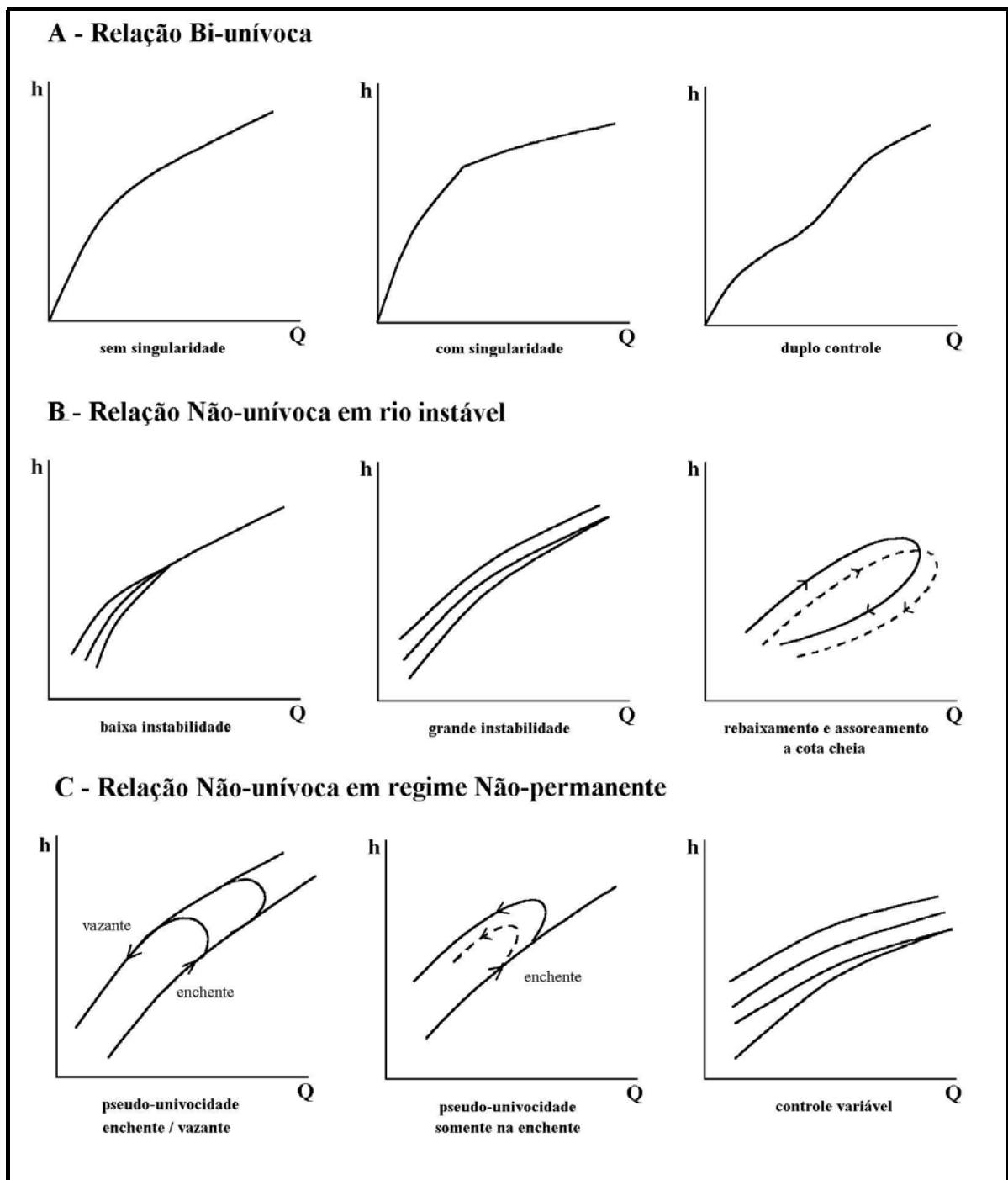


Figura 2.7 - Tipos de curva de calibragem. (Fonte: Jaccon e Cudo, 1989).

Na prática a calibragem da curva-chave torna-se difícil devido a alguns aspectos como destacam Moreira et al. (1996):

- a relação $Q \times H$ não é perfeitamente estável na maioria das estações; os processos cíclicos de erosão e assoreamento do leito dos rios provocam mudanças no comportamento do leito da curva-chave, especialmente no trecho inferior;
- grande parte das estações apresenta mais de um controle hidráulico, especialmente aquelas situadas próximas a pontes ou com seção de formato irregular, ou ainda sujeitas a

extravasamento, o que implica uma descontinuidade da curva-chave que terá um ajuste menos preciso;

- na maioria das estações há uma carência de medições em cotas altas e quando existem tem resultados menos precisos; além disso há uma má distribuição das medições ao longo do tempo, dificultando a identificação dos períodos de validade da curva-chave.

A calibragem de uma curva-chave pode ser uma tarefa muito mais complexa do que se imagina, exigindo do hidrólogo um profundo conhecimento técnico para identificar os problemas e, ao mesmo tempo, sensibilidade e experiência para propor soluções, haja visto que, por mais semelhantes que sejam duas estações fluviométricas, elas nunca serão idênticas, e na natureza os detalhes podem resultar em grandes diferenças.

2.8- O problema do “Laço” nas Curvas-chave

Geralmente o que se busca na calibração da curva-chave é encontrar uma relação entre as variáveis cota e descarga onde a cada cota corresponda uma única vazão e vice-versa, numa relação *biunívoca*. Porém, fisicamente, esse comportamento não acontece sempre. Ocorrem normalmente relações *unívocas*, onde se tem associada uma única vazão para cada cota (a recíproca não é obrigatória) ou *não-unívocas*, nos casos em que ocorrem vazões diferentes para uma mesma cota.

Graficamente a não-univocidade da relação cota-vazão, pode se traduzir no desenho de um “laço”, como o mostra a Figura 2.8.

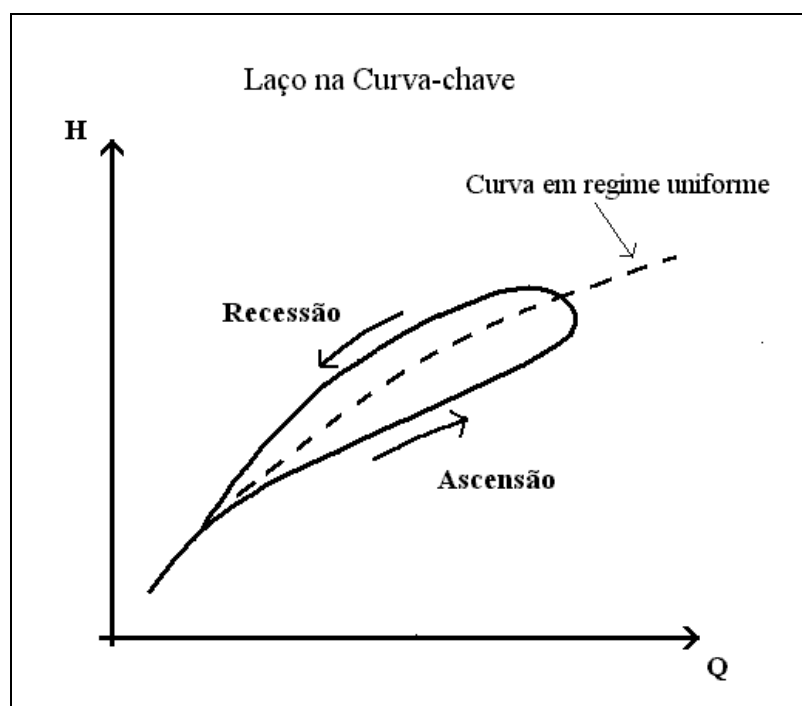


Figura 2.8 – Curva-chave em Laço. (Fonte: Fill, 1987).

Os fatores que provocam o laço ou a laçada na curva-chave podem ser: a passagem de uma onda de cheia num trecho de rio com baixa declividade, onde no momento ascensional a vazão é maior; seções ou controles instáveis e controle de jusante variável.

Outra causa do laço na curva-chave ocorre nas estações fluviométricas em trechos de rios próximos à oceanos, lagos, reservatórios ou desembocaduras em rios maiores. Esse fenômeno chamado *Efeito de Remanso*, ocorre quando o escoamento de montante sofre influência do escoamento de jusante. Nesse caso a declividade da linha d'água varia significativamente com o escoamento (Pedrollo et al., 1991)

Em estudo realizado pela Universidade do Rio Grande do Sul (2001), observou-se que as estações Passo das Canoas e Passo das Canoas Auxiliar no rio Gravataí, distantes cerca de 50 km da sua desembocadura no rio Guaíba, sofrem efeito de remanso desse último, por tratar-se de um rio com um volume de água muito maior. A partir da estação Praça da Harmonia no rio Guaíba, utilizada como apoio, e através de um modelo hidrodinâmico foi traçada, segundo denominação de Jacon e Cudo (1989) uma *Superfície de Calibragem*, ilustrada na Figura 2.9.

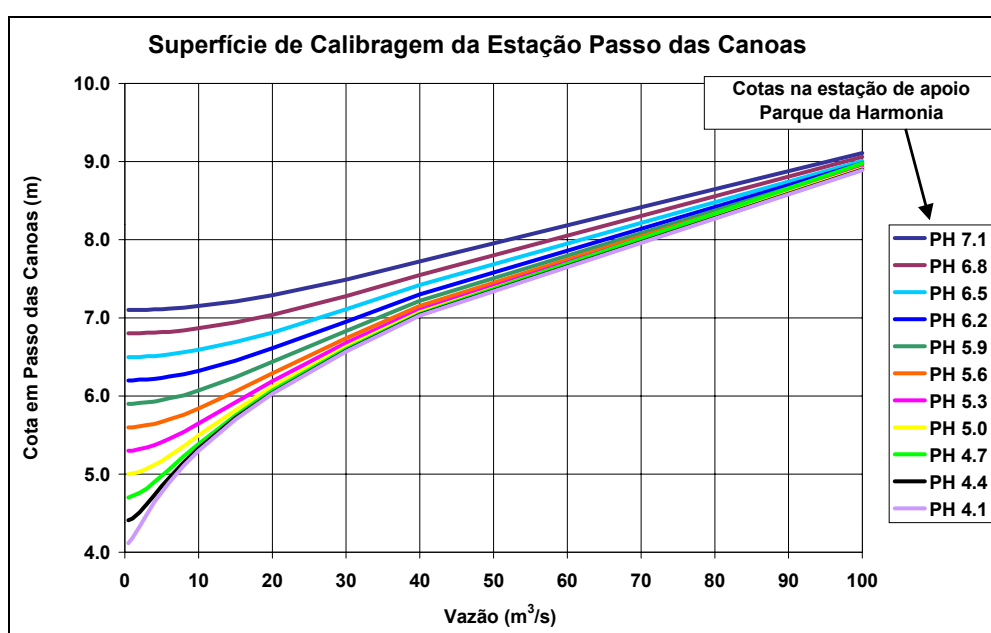


Figura 2.9 – Superfície de calibragem da estação Passo das Canoas no rio Gravataí. (adaptado de Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001).

Para se calcular a vazão numa dada cota na estação Passo das Canoas deve-se verificar qual a cota daquele dia em Parque Harmonia, determinando qual a curva a ser utilizada.

Finalmente, é importante lembrar, que em termos práticos, quando o estudo hidrológico necessita de vazões em um período longo, que inclua diversos ciclos de ascensão

e recessão, pode-se calibrar a curva-chave entre os ramos do laço formado no gráfico de QxH (Figura 2.8), porém mais próxima do ramo de recessão, já que os rios estão na maior parte do tempo nesse estado (Pinto, 1976).

2.9 – Transferência de Curva-chave

Uma outra metodologia para se traçar curva-chave é descrita e investigada por Muller et al. (1997). Trata-se da transferência da curvas-chave de uma estação fluviométrica numa seção de rio, para outra seção do mesmo rio, onde haja o registro das cotas, não havendo porém as medições de vazão para se delinear a curva-chave.

Os autores citam nessa condição, os casos onde são feitos estudos de aproveitamento hidroelétrico e há seções de réguas, que funcionam inicialmente como apoio às estações fluviométricas próximas, mas que por problemas quaisquer no decorrer do estudo, necessitam ter sua curva-chave determinada. Trata-se de uma situação bastante particular, mas a metodologia utilizada para a construção ou mais precisamente a transferência da curva-chave, pode ser aplicado em outras situações, como um apoio na calibração da curva-chave de uma estação, quando as medições de vazão se mostram insuficientes ou deficientes, e até mesmo como apoio na extrapolação da curva-chave, como será melhor detalhado no próximo item sobre extrapolação.

Muller et al. (1997) exploram e analisam dois métodos de transferência da curva-chave: por regressão linear simples e através da curva de permanência. A seguir a descrição dos métodos:

Regressão Linear Simples

Supondo-se a estação Y, aquela onde se tem registro diário de cotas sem curva-chave e X uma estação, no mesmo rio, com registro de cotas e curva-chave traçada. A partir de dados simultâneos de leitura de réguas nas duas seções (cotagrama), determina-se uma equação linear do tipo: $y = a_0 + a_1 \bullet x$, onde x é leitura de régua na seção X e y é a leitura de régua na seção Y. Os coeficientes a_0 e a_1 são facilmente determinados pelo método dos mínimos quadrados numa planilha eletrônica. Dessa forma se obtém uma relação para calcular qualquer cota em X a partir de uma cota em Y.

A vazão em Y é calculada considerando-se que todo volume d'água que passa em X passa também em Y (continuidade), acrescentando-se, no caso da transferência de montante para jusante, o aporte de água ocorrido entre as duas estações devido a área de drenagem ou descontando-se no caso contrário. Pode-se adotar, como sugerem os autores, uma relação

linear simples entre as áreas de drenagem contribuintes de cada seção (A_d), resultando na equação: $Q_y = (A_y / A_x) \cdot Q_x$, onde Q_y , é a vazão calculada em Y pela equação linear, para uma dada cota y_1 , e Q_x é a vazão medida ou calculada pela curva-chave em X, para a cota correspondente x_1 .

Curva de Permanência

Esse método assemelha-se ao anterior no cálculo da vazão, porém ao invés da regressão linear para se determinar as cotas da curva-chave na seção Y, utiliza-se as curvas de permanência das cotas, traçadas para as duas seções e considerando-se que a permanência é a mesma, uma vez que os eventos são os mesmos e as seções encontram-se no mesmo rio. O único inconveniente desse método são as falhas que ocorrem na curva-chave de Y nas faixas de cotas observadas mais raras. Pode-se corrigir tais falhas ajustando-se aos pontos existentes, uma a equação do tipo $Q = a (H - H_0)^n$, por mínimos quadrados.

A seguir na Figura 2.10, tem-se os resultados gráficos do trabalho de Muller et al. (1997) que faz uma comparação dos dois métodos de transferência da curva-chave: curva de permanência e correlação dos cotogramas, de estações a montante, com as vazões medidas nas seções apresentadas, que nesse caso dispõe desses dados. Os autores concluem que ambos os métodos fornecem resultados semelhantes e portanto podem ser aplicados.

Chama a atenção nos gráficos da Figura 2.10 que, com exceção da estação Cebolão onde os dois métodos e as medições praticamente se sobrepõe na faixa de cotas medidas, nas demais os métodos apresentam diferenças razoáveis entre si. Curioso também é que as vazões calculadas pelo método da curva de permanência são, via de regra, menores que aquelas calculadas pelo método das correlações. Além disso, parece haver uma tendência das medições nessa faixa de cotas estarem entre as curvas traçadas pelos dois métodos, pelo menos em três seções. De qualquer forma é uma opção bem razoável quando não se tem dado de vazão.

Importante lembrar que a curva-chave transferida de X para Y nos dois métodos, é válida dentro da faixa de cotas com medições de vazão.

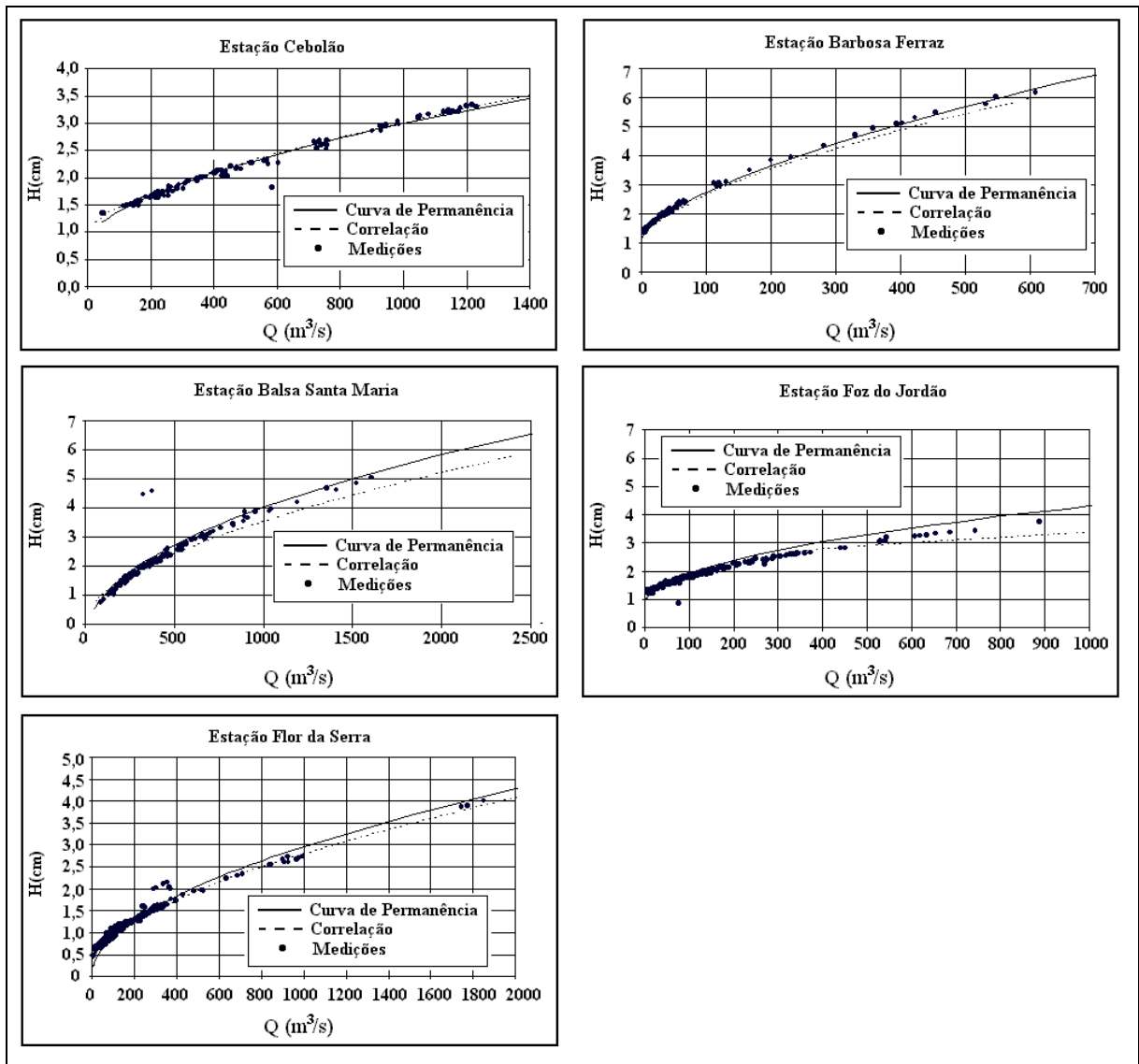


Figura 2.10 - Resultados de transferência de curva-chave por Muller et al. (1997).

Capítulo III - Métodos de extrapolação superior de Curvas-Chave

A extrapolação da curva-chave é necessária quando há valores de cota máxima diária observada maior que a maior cota registrada nas medições de vazão - caso da extrapolação superior - ou quando a menor cota diária observada for menor que a menor cota registrada nas medições de vazão - caso da extrapolação inferior (Figura 3.1).

A necessidade de extrapolação é a regra, e não a exceção entre as estações fluviométrica, principalmente a extrapolação superior da curva. Isto se dá devido à dificuldade de se ter um número suficiente de equipes a postos para efetuar medições de vazão nos momentos de cheia, ou quando isso acontece, pode haver a impossibilidade de se efetuar a medição devido aos riscos, em função das altas velocidades das águas no rio (Tucci e Silveira, 1985).

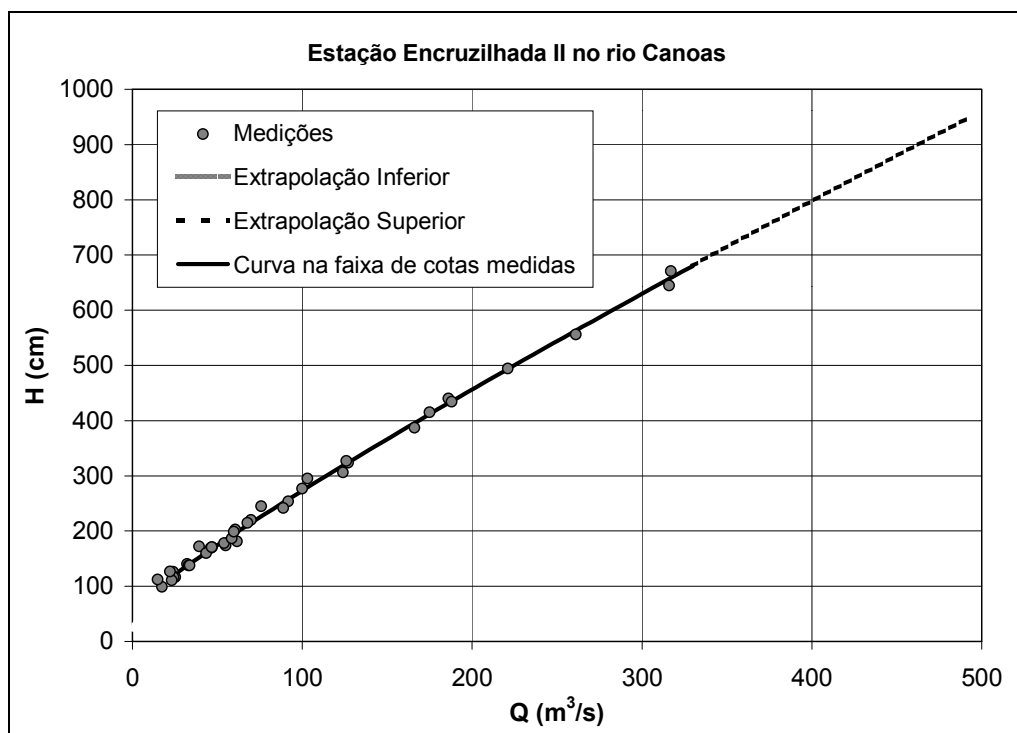


Figura 3.1 - Exemplo gráfico de extrapolação superior e inferior de curva-chave.

Extrapolar a curva-chave significa prolongar criteriosamente a mesma, além da faixa de cotas registradas nas medições de vazão, a fim de se evitar falhas no fluviograma ou com o propósito de se estimar a vazão para uma cota extrema qualquer.

A hidrologia desenvolveu metodologias e critérios para se extrapolar a curva-chave, de forma a minimizar os erros inerentes a este processo.

3.1 – Metodologias tradicionais de extrapolação superior

Os métodos descritos a seguir são os mais simples e tradicionalmente utilizados. Uma condição comum a todos é de que o escoamento na seção linimétrica seja uniforme ou bem próximo disto, o que é razoável se os cuidados técnicos na escolha do local da estação forem observados.

Os dois primeiros métodos, Logarítmico e Stevens, são indicados para situações onde a extrapolação não atinge as planícies de inundação, sem o extravasamento da calha menor do rio. Os métodos de Manning e da Velocidade x Área podem ser aplicados em tais casos desde que se subdivida a seção transversal em subseções homogêneas, sob o ponto de vista do escoamento, como será descrito posteriormente.

3.1.1 - Método Logarítmico

Este método, segundo Fill (1987), é provavelmente o mais usado no Brasil, para extrapolação superior. Baseia-se na hipótese de que pelo menos o trecho superior da curva-chave, na faixa de cotas medidas, obedece a equação em forma de potência do tipo apresentado na equação 2.1, mantendo, na faixa de cotas extrapolada, os valores dos coeficientes a e n ajustados para aquele trecho.

A equação 2.1, a que se refere o método, é resultante da equação de Manning, dado que o método baseia-se nas equações do movimento uniforme, supondo uma seção transversal regular.

O método chama-se logarítmico pois a solução analítica da equação recai na aplicação da função logarítmica nos dois termos da mesma. Isso implica que, ao se graficar a curva-chave num papel log-log, o gráfico resultante é uma reta.

Existem programas de hidrologia desenvolvidos com propósito de determinar automaticamente os coeficientes da referida equação 2.1, como o *Grafchav*, produzido pela Coordenação de Programa de Pós-graduação de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (Grafchav, 1996).

O método requer as seguintes condições:

- Relação $Q=f(H)$ unívoca com bom alinhamento das medições médias e altas;
- Perfil transversal sem descontinuidade de forma na faixa de cotas extrapoladas (regular) e estável ou com baixa instabilidade;
- Permanência de controle entre as cotas médias e altas.

Em virtude dessa restrição de se ter um controle estável e as características geométricas constantes, o método é inadequado para extrapolações inferiores.

Tucci e Silveira (1985) chamam a atenção ainda para os seguintes aspectos sobre o método logarítmico:

- os valores maiores de vazão exercem uma tendenciosidade maior sobre a definição da curva e podem introduzir erros nos valores menores de vazão;
- quando existe um grande número de medições para vazões menores, a curva obtida por mínimos quadrados dá mais peso a esses valores, o que modifica a curvatura para valores maiores de níveis, onde existem poucos pontos, criando uma tendenciosidade.

3.1.2 - Método de Stevens.

Este método, proposto por Stevens está baseado na fórmula de Chezy para o escoamento uniforme em canais como mostra o desenvolvimento a seguir baseado em Jaccon e Cudo (1989):

Equação de Chezy apresentada por Stevens:

$$V = C\sqrt{R_h i} \quad 3.2$$

Onde: V – velocidade média do escoamento na seção (m/s).

C - coeficiente variável, função do raio hidráulico e da natureza do leito.

R_h – raio hidráulico (m)

i - declividade da linha de carga assumida igual a I e J .

Igualando a equação da continuidade a fórmula de Chezy tem-se:

$$\frac{Q}{A_m \sqrt{R_h}} = C\sqrt{J} \quad 3.3$$

Onde $A_m R_h^{1/2}$ é o fator geométrico e $C \cdot J^{1/2}$ é o fator de declividade.

Verifica-se se o fator de declividade é constante graficando-se $A_m R_h^{1/2}$ em função da vazão, e obtendo-se uma reta bem alinhada pelo menos no trecho final da curva.

Determina-se o valor de $A_m R_h^{1/2}$ referente à cota que se deseja extrapolar, visto que este é função da cota e pode ser calculado para qualquer valor desta desde que dentro dos limites de levantamento da seção.

Finalmente, prolonga-se a reta do gráfico de $A_m R_h^{1/2} \times Q$ até o valor de $A_m R_h^{1/2}$ calculado anteriormente, obtendo-se a vazão graficamente, como mostra a Figura 3.2.

As condições de aplicação do método de Stevens são:

- o escoamento deve ser quase uniforme (pseudo-uniforme);

- perfil estável ou com baixa instabilidade e $A_m R_h^{1/2}$ não variando entre cheia e depleção;
- dispor de um número suficiente de medições corretamente alinhadas refletindo a estabilização da curva $Q = f(A_m R_h^{1/2})$;
- Esse método, segundo Tucci e Silveira (1985), têm a vantagem de não depender das velocidades medidas, já que, nas medições de vazão, é comum utilizar-se duas ou até três seções diferentes o que poderia implicar em diferenças.

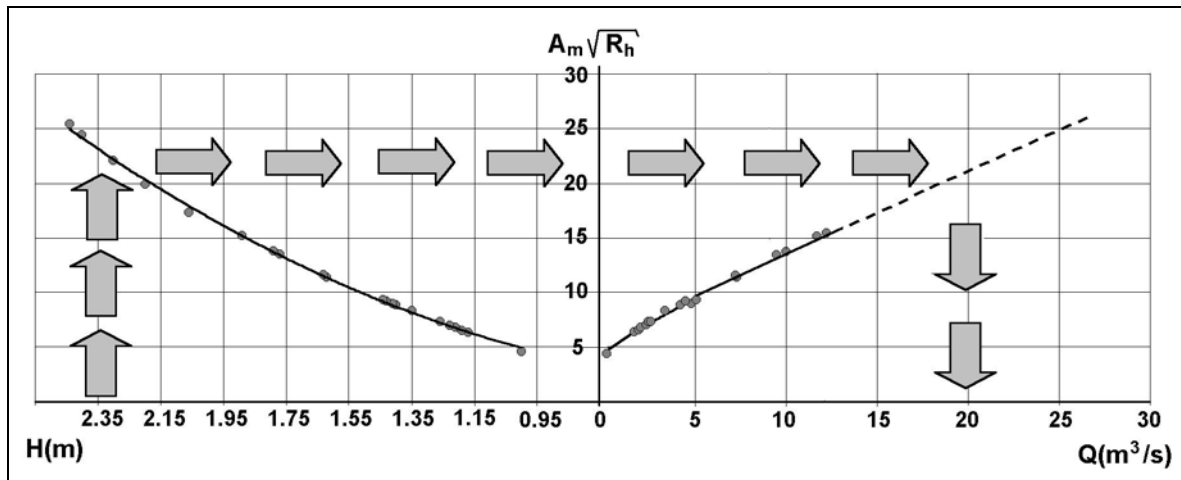


Figura 3.2 - Extrapolação pelo método de Stevens (adaptado de Jacon e Cudo, 1989).

3.1.3 - Método de Manning

A partir da equação de Manning (equação 2.5) e da equação da continuidade, esse método considera que o quociente da raiz da declividade da linha d'água pelo coeficiente de rugosidade de Manning (equação 3.4) tende a tornar-se constante em vazões altas (Tucci e Silveira, 1985).

$$K_m = \frac{\sqrt{J}}{\eta} = \frac{Q}{A_m R_h^{2/3}} \quad 3.4$$

onde K_m é denominado, neste trabalho, de coeficiente de Extrapolação por Manning evitando-se assim confundir com o coeficiente K de Strickler ($1/\eta$), por vezes representado na bibliografia por k (minúsculo).

O método consiste no seguinte:

- Graficar os pontos $K_m \times H$, para cada uma das medições de vazão efetuadas, e observar se há uma tendência assintótica bem definida da curva resultante;
- em caso positivo, prolonga-se a curva até os valores de cota que se deseja extrapolar a curva-chave, estimando-se os valores de K_m , como mostra a Figura 3.3;

- com o valor de K_m estimado e A_m e R_h calculados para os valores de cota a serem extrapolados, calcula-se Q com base na equação 3.4. Obtém-se assim novos pares de cota-vazão que definem a extrapolação superior da curva-chave;

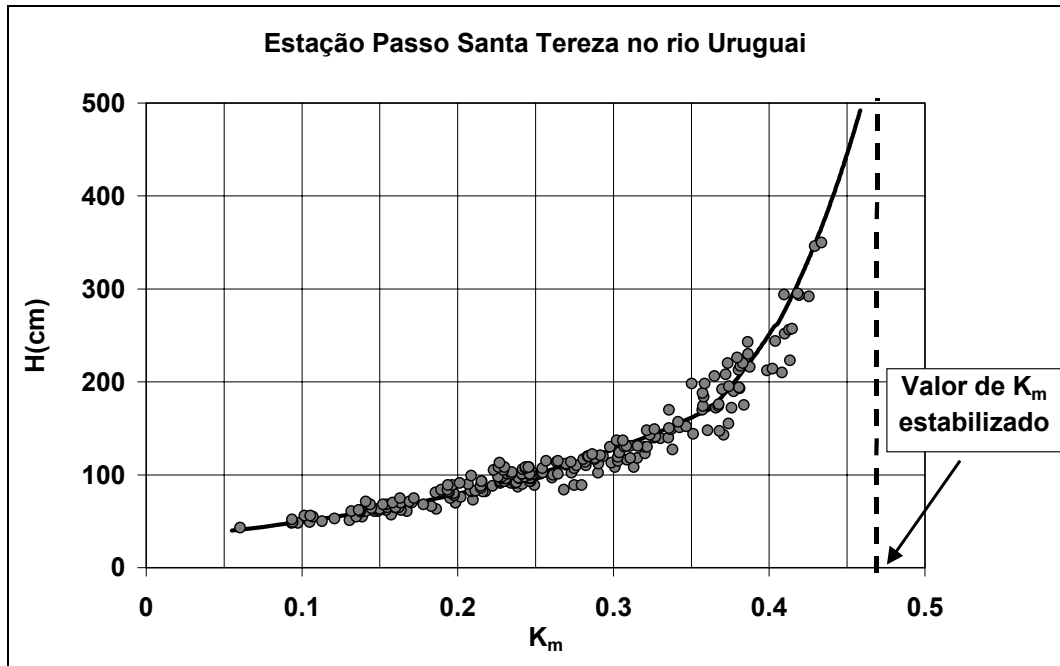


Figura 3.3- Exemplo da extrapolação de K_m no método de Manning.

A principal desvantagem desse método, segundo Tucci e Silveira (1985), se deve ao fato de que nem sempre a faixa de cotas das medições feitas define bem a assintoticidade da curva $K_m=f(H)$, transferindo para a curva-chave a incerteza do valor estimado de K_m . Além disso pode ocorrer, principalmente devido à vegetação mais densa das margens, uma inversão nos valores de K_m , alterando completamente o gráfico e provocando graves erros na extrapolação da curva-chave, como mostra a Figura 3.4.

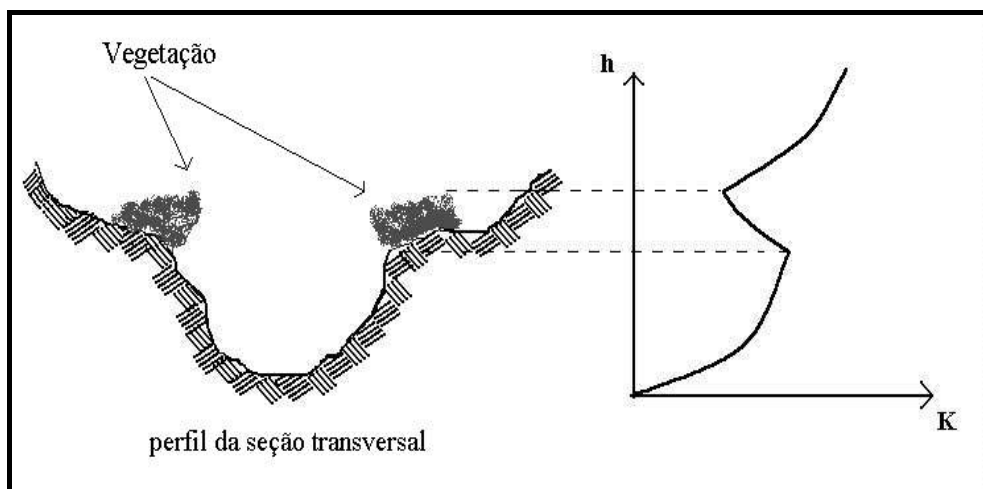


Figura 3.4 - Efeito da vegetação sobre K_m num curso d'água.

3.1.4 – Método Velocidade x Área

Este método admite que, para as cotas elevadas, a velocidade média cresce linearmente em relação às cotas (Sanches, 2000; Tucci e Silveira, 1985). O método consiste em graficar as velocidades médias medidas pelas cotas referentes, e extrapolar a curva (reta) ajustada para esses pontos, quando essa tendência for bem definida e houver um número de pontos suficiente para admiti-la, como mostra o exemplo da Figura 3.5.

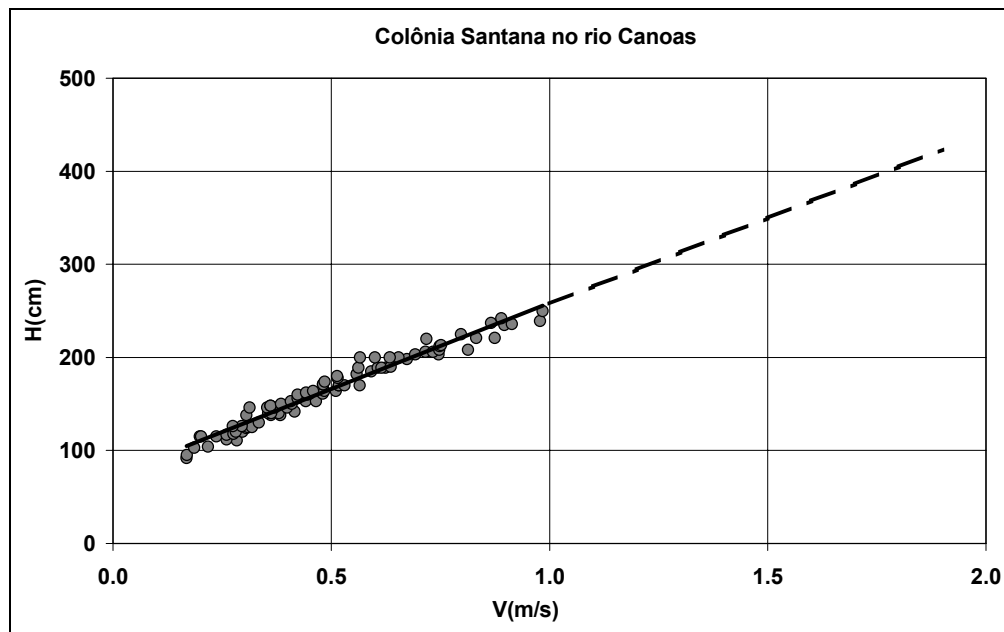


Figura 3.5 - Variação da velocidade média em função das cotas e respectiva extrapolação.

Estimam-se graficamente valores de velocidade média para as cotas a serem extrapoladas. Em seguida, a partir do levantamento do perfil transversal, calcula-se a área referente a essas cotas e finalmente, com o auxílio da equação da continuidade, estima-se a vazão extrapolada. O método da Velocidade x Área não é recomendado para os casos em que o gráfico de $V \times H$ não define bem uma reta na sua parte superior.

Uma desvantagem desse método, segundo Tucci e Silveira (1985), é sua dependência da variável velocidade, medida comumente em seções diferentes, o que pode comprometer os resultados.

Jacon e Cudo (1989) propõem o método de extrapolação denominado **Superfície Molhada e Velocidade Média** a partir da extrapolação do gráfico da velocidade média medida pela cota. No entanto, os autores sugerem que a extrapolação da curva $V=f(H)$ pode ser facilitada por meio da aplicação da fórmula de Strickler:

- seja calculando-se a velocidade média para todo valor da declividade superficial medida no campo (situação pouco freqüente), estimando-se a rugosidade K a partir das medições;
- seja considerando-se que a velocidade média varia como $R_h^{2/3}$ (isto é $V/R_h^{2/3} = \text{cte}$), quando as observações de campo confirmam a estabilidade da declividade superficial em cotas altas.

Esta segunda opção, que se adequa melhor à situação mais freqüente das estações, onde não se tem medições da declividade da linha d'água, é uma variação do método de Manning, sugerido por Tucci e Silveira (1985). Este método sugerem os autores, pode ser aplicado nos casos em que ocorre o extravasamento do leito menor para o leito maior do rio. Neste caso, decompõe-se a seção transversal em duas ou mais subseções conforme a homogeneidade do escoamento, função básica das características de rugosidade do leito (η), seguindo a inclinação da barranca do rio, como no exemplo da Figura 3.6. Desde que se tenha medição de vazão suficientes no leito maior e seja possível determinar, a partir das planilhas de campo, as velocidades médias em cada subseção, aplica-se o método separadamente, determinando as vazões parciais em cada subseção, que, somadas, resultam na vazão total da seção para as cotas a serem extrapoladas.

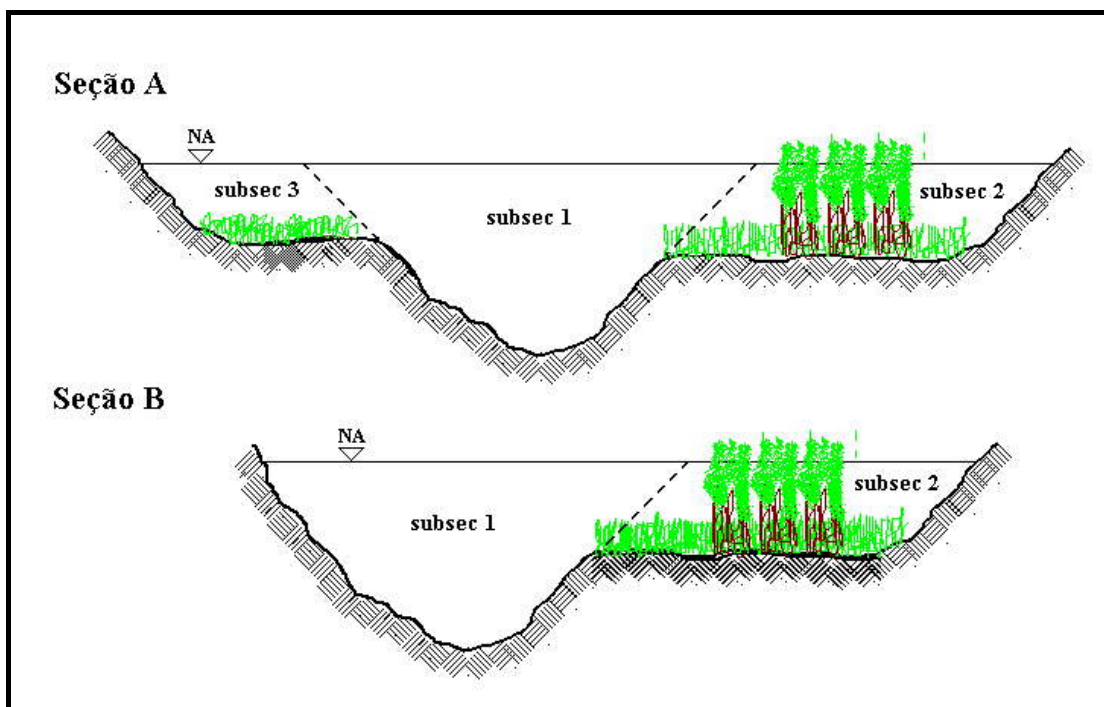


Figura 3.6 - Seções com extravasamento da calha menor do rio.

Quanto ao critério de decomposição da seção, Villanueva (1997) chama a atenção para as novas tentativas que têm sido feitas, aprimorando a identificação de planos de tensões tangenciais nulas, sem resultados significativos até agora.

3.1.5 – Outros métodos

Tucci e Silveira (1985) propõem três métodos para a extrapolação superior da curva-chave baseada na equação de Manning para seções onde ocorre o extravasamento do leito menor do rio para as planícies de inundação, escolhidas a partir dos dados disponíveis. A seguir tem-se uma descrição sucinta das metodologias:

Método 1

Dados disponíveis :

- medições de vazão apenas na calha menor do rio;
- estimativa dos valores do coeficiente de Manning (η_1, η_2, \dots) a partir de visitas ou fotos do local da estação fluviométrica.

Método:

1. decompõe-se a seção transversal em duas ou mais subseções conforme o exemplo da Figura 3.6;
2. com as vazões e áreas medidas na calha menor do rio, η_1 estimado e R_h calculado, determina-se, por Manning, a declividade da linha d'água (J), traça-se o gráfico de $J=f(H)$ e estima-se um valor de J para as cotas mais altas a serem extrapoladas, em função da assintoticidade da curva;
3. considerando-se a declividade da linha d'água estimada como sendo estável para as cotas extremas, e tomando como exemplo um perfil com duas subseções, decompõe-se a vazão total (Q) em duas como mostra a equação 3.5;

$$Q = \left(\frac{A_{m1}}{\eta_1} R_{h1}^{2/3} + \frac{A_{m2}}{\eta_2} R_{h2}^{2/3} \right) \sqrt{J} \quad 3.5$$

4. a partir dessa decomposição da vazão, com as variáveis geométricas calculadas em função da cota, a declividade e os coeficientes de Manning estimados, calcula-se Q para as cotas de extrapolação.

Método 2

Dados disponíveis :

- medições de vazão no leito maior do rio;
- estimativa dos valores do coeficiente de Manning (η_1, η_2, \dots) a partir de visitas ou fotos do local da estação fluviométrica.

Método:

1. a partir da mesma decomposição da seção transversal do método 1 pode-se expressar a equação 3.5 como segue:

$$Q = (C_1 + C_2)\sqrt{J} \quad 3.6$$

com

$$C_1 = \frac{A_{m1}}{\eta_1} R_{h1}^{2/3} \quad 3.7$$

$$C_2 = \frac{A_{m2}}{\eta_2} R_{h2}^{2/3} \quad 3.8$$

2. Calcula-se C_1 e C_2 para todas as medições totais de vazão feitas, e traça-se o gráfico de $J=f(H)$, a partir da equação 3.6, deixando J em evidência;
3. Finalmente, considerando-se a assintoticidade da curva $J=f(H)$, e a estabilização da declividade da linha d'água, como no método 1, estima-se um valor para J nas cotas extremas e calcula-se as vazões parciais das subseções, que somadas resultam na vazão total (Q), para as cotas extrapoladas

Método 3

Dados disponíveis :

- declividade do leito no trecho do posto;
- medições de vazão apenas na calha menor do rio;
- estimativa dos valores do coeficiente de Manning (η_1, η_2, \dots) a partir de visitas ou fotos do local da estação fluviométrica.

Método:

Esta situação assemelha-se a primeira com a vantagem de se conhecer a declividade do leito. Dessa forma emprega-se a mesma metodologia, sem a necessidade de se definir a curva de $J=f(H)$ para a estimativa da declividade.

A expectativa é de que esses três métodos descritos anteriormente tendam a apresentar melhores resultados na medida que a estimativa dos coeficientes de Manning se aproximem do real, tarefa que pode ser mais complicada do que aparenta ser. Além disso, outro dado pouco comum a disposição, no caso do método 3, é a declividade do leito do rio.

Pode-se também adotar como ferramenta auxiliar na extrapolação da curva-chave a metodologia de transferência da curva-chave (ver item 2.8), pelo método da correlação das cotas (Muller et al., 1997). Neste caso é necessária uma estação de apoio, com curva-chave de qualidade, localizada no mesmo rio da estação em estudo e o mais próximo desta. No caso é

importante que a extrapolação se limite às cotas referentes na estação de apoio, onde foram realizadas medidas de vazão, evitando transferir também a faixa de extrapolação da curva-chave do apoio. Essa condição em geral restringe a transferência de algumas poucas medições, mas que podem ser decisivas na escolha de um método de extrapolação.

Além das metodologias anteriormente apresentadas existem procedimentos mais sofisticados para o estudo e a definição dos ramos inferiores e superiores da curva-chave como o cálculo de remanso ou leitura de cotas simultâneas em outra seção próxima (Fill, 1987) ou o uso de modelos matemáticos de precipitação-vazão ou vazão-vazão (Tucci e Silveira, 1985). Estas técnicas que possuem maior grau de confiabilidade final, mas necessitam de informações pouco disponíveis entre as estações fluviométricas no país.

3.2 – Comparação entre métodos de extrapolação

Dada as imprecisões inerentes a extrapolação das curvas-chave é de grande valia a aplicação do maior número de métodos disponíveis, tanto quanto permitam os dados e as limitações impostas por cada método. No entanto uma questão fundamental que surge é a escolha ou a ponderação que se deve dar a cada método, uma vez que na faixa de extrapolação não se tem medição de vazão para balizar uma comparação entre os métodos.

Gomes et al. (2001) propõem uma metodologia para análise conjunta de métodos de extrapolação num conjunto de estações fluviométricas situadas num mesmo rio. Em linhas gerais os autores, baseados em Christofolletti (1981), admitem que as seções transversais ao longo de um determinado rio, mesmo considerando as planícies de inundação, podem guardar entre si uma relação que justifique a análise em conjunto de suas curvas-chave. Em linhas gerais a metodologia segue as seguintes etapas:

- efetua-se a extrapolação das curvas-chave utilizando os métodos que se tenham a disposição. No trabalho citado foram utilizados o método de Stevens pela equação de Manning, e as extrapolações Linear, Logarítmica e Polinomial;
- adotando-se o conceito de *permanência das leituras de cota* das estações, uma vez que as estações localizam-se no mesmo rio, calculam-se os níveis para percentuais de permanência mínimos, que forçosamente caem na faixa de extrapolação da curva-chave. No caso utilizaram-se os níveis característicos de 0,1% , 0,05% e 0,01% de permanência;
- calculam-se as *Vazões Específicas* (Q_{esp}) para as estações selecionadas, nos três níveis característicos escolhidos, a partir dos valores de vazão fornecidos pelos diferentes métodos de extrapolação utilizados e da área de drenagem (A_d) contribuinte em cada estação (Q/A_d);

- finalmente, relacionam-se graficamente as vazões específicas com índices fisiográficos nas bacias de drenagem de cada estação. No caso utilizaram-se os índices: fator de forma, fator de compacidade, densidade de drenagem e declividade média da bacia.

A Figura 3.7 exemplifica os resultados obtidos para um nível de 0,05% de permanência das cotas, em cinco estações analisadas pelos autores

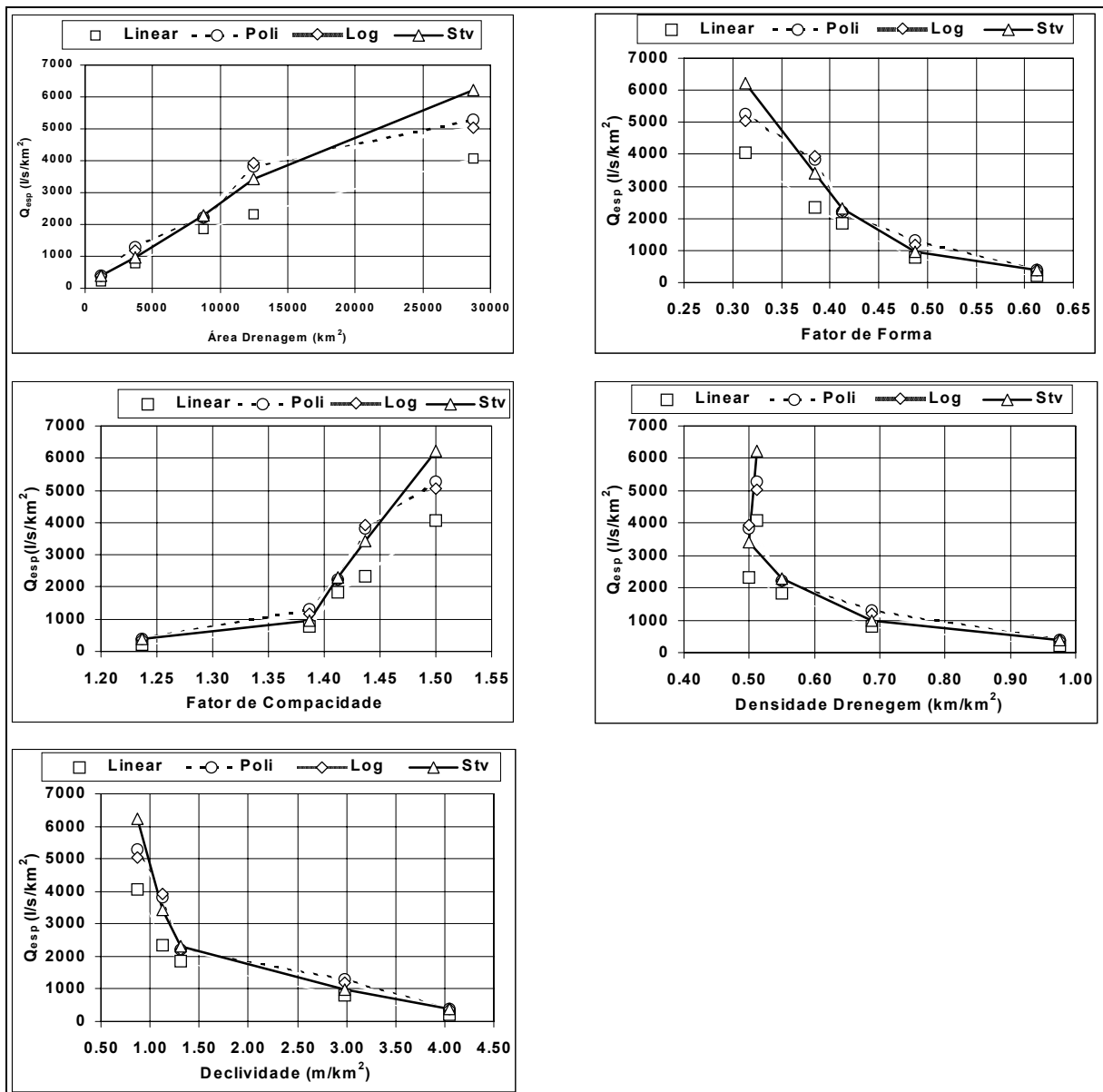


Figura 3.7 – Vazão específica contra fatores fisiográficos (adaptado de Gomes et al., 2001).

A partir da análise dos gráficos, pode-se verificar que o método de Stevens apresenta uma variação mais uniforme de Q_{esp} , em relação aos índices fisiográficos, que aquelas calculadas pelos métodos polinomial e logarítmico.

A proposta da metodologia, segundo os autores, é de um procedimento adicional para a análise e validação dos resultados das extrapolações.

Outra metodologia proposta de comparação entre métodos de extrapolação da curva-chave, é a utilização da *transferência de vazões* extremas de outras estações no mesmo rio (apoios) adotando as premissas e limitações do método de transferência de curva-chave quando os dados assim o permitirem, seja por regressão linear simples ou pela curva de permanência. Assim pode-se ter um ou mais pontos no gráfico de $Q \times H$, na faixa de cotas extrapoladas, que auxiliem na escolha de um dos métodos utilizados. Importante é que as vazões transferidas da estação de apoio estejam dentro da faixa de cotas medidas, condição que reduz as situações de aplicação do método, no entanto, minimiza a transferência dos erros de extrapolação de uma estação para outra.

Finalmente, uma terceira metodologia para comparação entre métodos de extrapolação numa mesma estação fluviométrica é a de *Pseudo-extrapolação*, proposta e avaliada no presente trabalho, sendo detalhada no item 4.5.

3.3 – Estudos de extrapolação superior de curva-chave

É patente a falta de estudos comparativos entre métodos de extrapolação superior e inferior de curva-chave na bibliografia que engloba o assunto. No entanto, os três estudos mostrados a seguir ilustram bem a necessidade e a importância do tema, tendo em vista, como será mostrado, que nem sempre a metodologia mais sofisticada implica nos menores erros de extrapolação.

O *primeiro caso* é um estudo de investigação sobre métodos de extrapolação superior da curva-chave realizada por Gomes (1997). O autor faz uma comparação entre três metodologias de extrapolação: *Logarítmica*, *Polinomial* e por *Stevens*, este último dividido em quatro formas de se calcular o R_h . Para o estudo foi escolhida a estação fluviométrica de Salto Caxias no rio Iguaçu, no município de Realeza (PR). Com uma área de drenagem de 57.974 km². Utilizou-se um total de 123 medições feitas entre os anos de 1996 e 1997, numa amplitude das cotas de 4,15m com vazões variando de 571 m³/s a 8.650 m³/s.

A extrapolação Logarítmica utilizada é idêntica à apresentada no item 3.1.1 do presente trabalho. A extrapolação Polinomial consistiu no ajuste de uma função polinomial ao conjunto de medições, com especial atenção aos pontos de máximo, mínimo e inflexão da curva obtida.

Por fim o método de Stevens apresentou algumas diferenças daquele utilizado no presente trabalho. Ao invés da equação de Chezy, Gomes utilizou a equação de Manning, uma possibilidade citada por Jaccon e Cudo (1989). Desta forma o fator geométrico passa a ser $A_m R_h^{2/3}$ e não $A_m R_h^{1/2}$. Outra diferença é a variação no cálculo do R_h , como sugere French (1986). A Figura 3.8 mostra esquematicamente essas variações, descritas a seguir:

- Stevens 1 – $A_m = \text{Polígono (abcdefgh)}$ e $P_m = \text{Segmento (abcdefgh)}$

$$R_h = A_m / P_m$$

- Stevens 2 – $A_m \text{ Canal Principal} = \text{Políg. (icdefji)}$ e $P_m = \text{Seg. (icdef)}$

$$A_m \text{ Sub-seção 1} = \text{Políg. (abcia)} \text{ e } P_m = \text{Seg. (abc)}$$

$$A_m \text{ Sub-seção 2} = \text{Polígono (jfhgj)} \text{ e } P_m = \text{Seg. (fgh)}$$

- Stevens 3 – $A_m \text{ Principal} = \text{Políg. (icdefji)}$ e $P_m = \text{Seg. (cdef)}$

$$A_m \text{ Sub-seção 1} = \text{Políg. (abcia)} \text{ e } P_m = \text{Seg. (abc)}$$

$$A_m \text{ Sub-seção 2} = \text{Polígono (jfhgj)} \text{ e } P_m = \text{Seg. (fgh)}$$

- Stevens 4 – $A_m \text{ Principal} = \text{Políg. (kcdefk)}$ e $P_m = \text{Seg. (cdef)}$

$$A_m \text{ Sub-seção 1} = \text{Políg. (abcka)} \text{ e } P_m = \text{Seg. (abc)}$$

$$A_m \text{ Sub-seção 2} = \text{Polígono (kfhgk)} \text{ e } P_m = \text{Seg. (fgh)}$$

$$R_h = \frac{[A_m(kcdefk)^2 / P_m(cdef)] + [A_m(abcka)^2 / P_m(abc)] + [A_m(kfhgk)^2 / P_m(fgh)]}{A_m(kcdefk) + A_m(abcka) + A_m(kfhgk)}$$

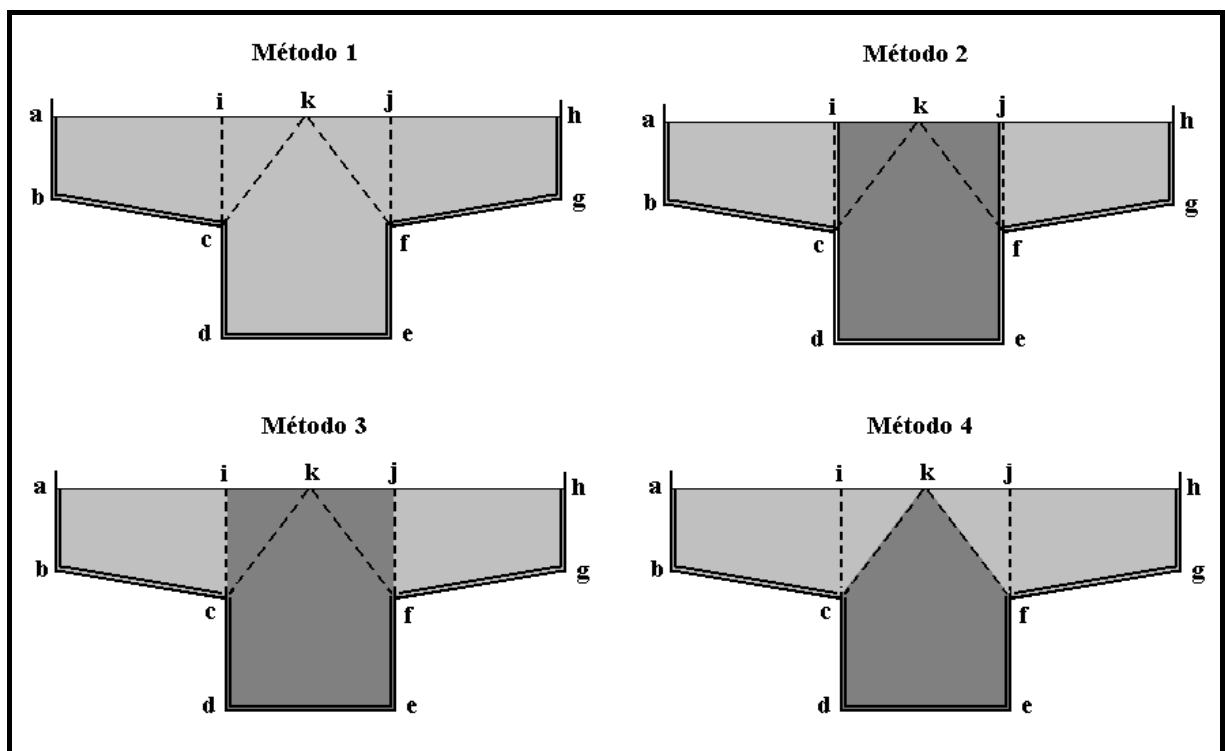


Figura 3.8 – Representação esquemática do cálculo de R_h (adaptado de Gomes, 1997).

Nos métodos de Stevens de 1 e 4 o raio hidráulico é único sendo aplicado diretamente no gráfico de $Q \times A_m R_h^{2/3}$ onde ajustou-se uma reta por mínimos quadrados. Já nos métodos de Stevens 2 e 3 estabeleceu-se uma correlação linear múltipla adotando $A_m R_h^{2/3}$ das subseções como variáveis independentes e a vazão como a variável dependente.

No entanto, para o cálculo de R_h surge o problema de onde delimitar o nível de extravasamento da calha menor. O autor adotou o critério de relação do débito das margens plenas, descrita por Cristofolletti (1981).

Os resultados das extrapolações encontram-se na Tabela 3.1 e em forma de gráfico na Figura 3.9.

Tabela 3.1 – Resultado das extrapolações superiores da estação Salto Caxias.

Cota (m)	Vazão (m ³ /s)					
	Logarítmico	Polinomial	Stevens 1	Stevens 2	Stevens 3	Stevens 4
262	9165	9074	8604	9074	9074	9203
264	15228	15262	13175	15262	15262	15889
266	22357	22878	18221	22878	22878	24306
268	30449	31923	23740	31923	31922	34453
270	39427	42396	29734	42396	42395	46329

(Fonte: Gomes, 1997).

Nota-se que as extrapolações Polinomial, Stevens 2 e Stevens 3 praticamente se sobrepõem. O método de Stevens 1, aplicado na forma tradicional, produziu os menores valores de vazão.

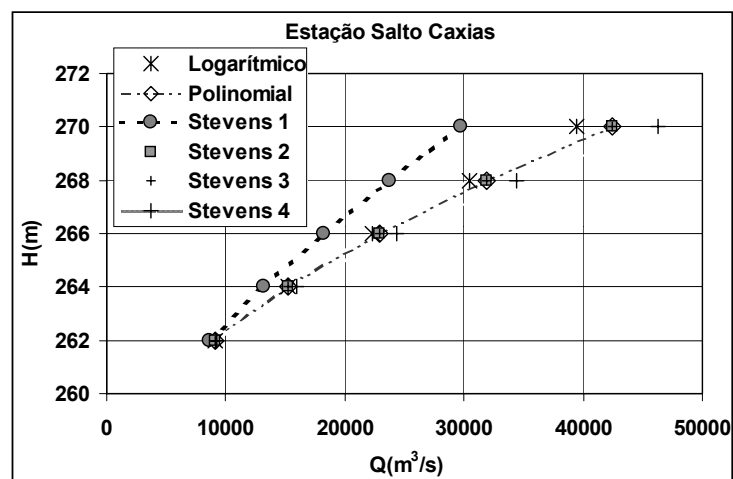


Figura 3.9 – Extrapolações superiores da curva-chave de Salto Caxias.

O autor recomenda uma investigação mais profunda na definição de critérios para delimitação das subseções e na interpretação física de $Q=f(A_m R_h^{2/3})$, tanto na consideração da seção única como na seção composta.

O *segundo caso* é citado por Fill (1987). Trata-se da curva-chave na estação fluviométrica de União da Vitória no rio Iguçu, entre os estados do Paraná e Santa Catarina. Foram feitas várias extrapolações por algumas entidades com interesse na estação. A Figura 3.10 mostra a evolução dessas extrapolações no tempo, destacando em alguns casos a vazão máxima disponível na época e a metodologia de extrapolação utilizada.

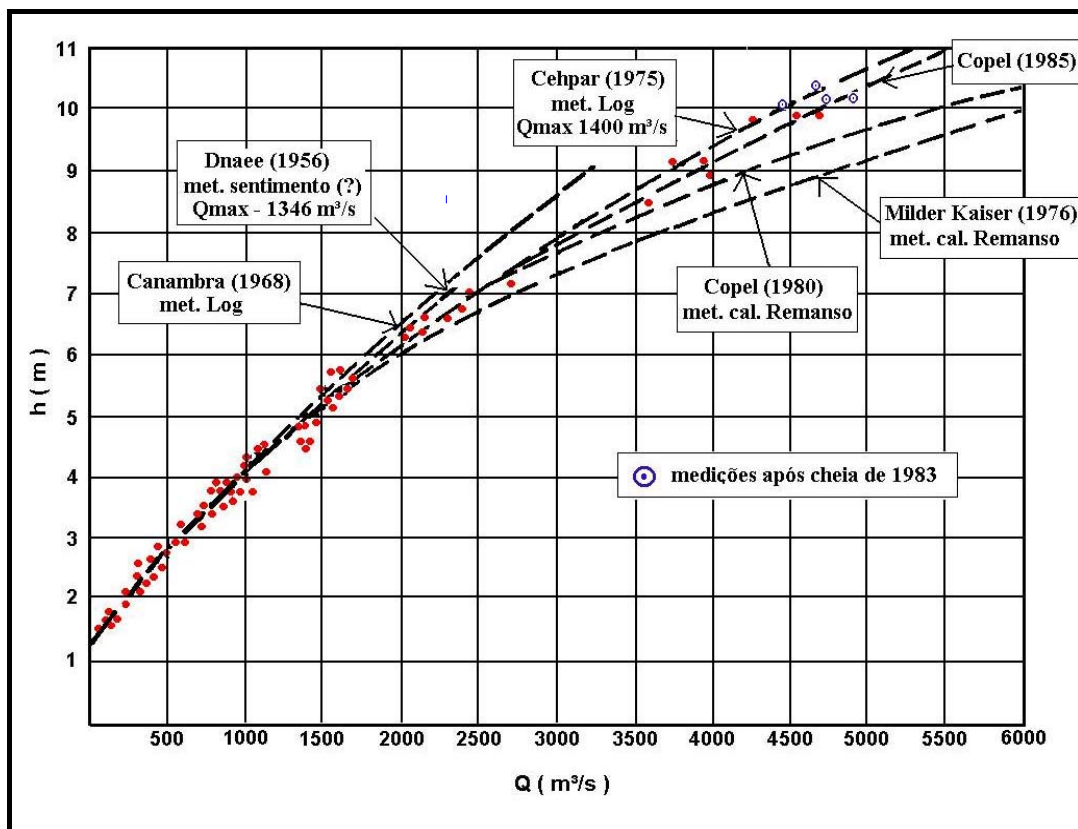


Figura 3.10 - Curva-chave da estação União da Vitória, rio Iguçu (adaptado de Fill, 1987).

É curioso notar que a extrapolação feita pelo Cehpar em 1975, utilizando o método logarítmico, da cota 6 m até a cota 11 m, obtém resultados muito bons. As extrapolações da Copel em 1980 e da Milder Kaiser em 1976, utilizando o cálculo de remanso, acabam por superestimar as vazões em cerca de 22% e 33% respectivamente na cota 10 m. Essa análise pôde ser feita depois da cheia de 1983, quando novas medições permitiram estender a curva até este ponto, num estudo da Copel em 1985.

Este exemplo mostra como os métodos mais avançados não resultam necessariamente em melhores extrapolações. Isso não significa também que as extrapolações mais simples

devam ser preferidas sempre. Note que a extrapolação da Canambra de 1968, pelo método logarítmico subestima a vazão na cota de 9 m em 17%.

O *terceiro caso* é um estudo feito por Moreira et al. (1991) que analisa a curva-chave do posto de Caramujo, no rio Trombetas, estado do Pará. A curva-chave foi inicialmente traçada e extrapolada a partir de um conjunto de 231 medições, feitas entre os anos de 1983 a 1986. A cota máxima medida nesse período foi 17,20m. Foram feitas extrapolações por cinco metodologias tradicionais e adotou-se a extrapolação por remanso, utilizando como apoio a estação de Cachoeira Porteira, 3600m a montante. Após a continuidade das medições e as cheias de abril a junho de 1989, a curva foi novamente calibrada e extrapolada. Desta vez utilizou-se o cálculo de remanso para calibrar o coeficiente de rugosidade de Manning por faixas de cota, que orientou a nova extrapolação (Figura 3.11).

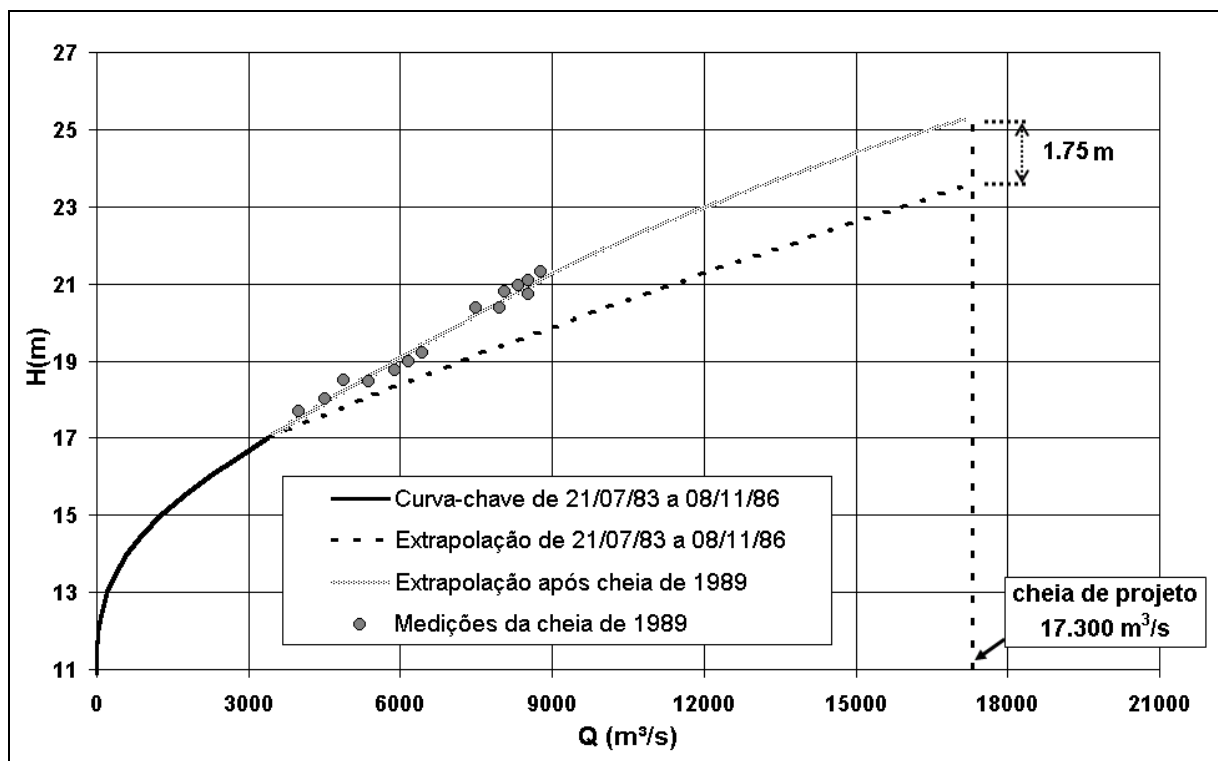


Figura 3.11 – Curva-chave da estação Caramujo no rio Trombetas.

(adaptado de Moreira et al, 1991).

Nota-se novamente que a extrapolação por cálculo de remanso superestimou as vazões. O autor chama a atenção para a necessidade de se utilizar uma faixa de segurança acima e abaixo do trecho extrapolado, de 10 a 15% da diferença entre a cota de vazão nula e a cota extrapolada. No entanto, há necessidade de se verificar esse percentual sugerido, em um número significativo de estações para que se possa confirmar ou não a generalização desses valores.

Jaccon e Cudo (1989) sugerem que a extrapolação da curva-chave deva ser feita pelo maior número de métodos cujas condições e informações o permitam, comparando-se os resultados obtidos.

A variação na precisão das curvas-chave é grande. As melhores curvas têm erros abaixo de 3%, que é menor que a precisão das próprias medições, em torno de 5% em condições normais (Silveira, 1974). Esse ganho é devido à compensação de erros quando há varias medições para uma mesma cota. Segundo Fill (1987), o que se considera normal é uma precisão de 5 a 10%, dentro da faixa de vazões medidas, e 10 a 20% na faixa extrapolada. Há casos de erros acima de 50% na extrapolação, que já não podem ser aceitos. Falhas de medições, metodologia de extrapolação inadequada, influência de remanso, instabilidade do leito, declividade variável, podem ser, isolada ou conjuntamente, a fonte de erros nesse caso.

Uma prática que não pode ser admitida, segundo Jaccon e Cudo (1987), é extrapolar uma curva simplesmente seguindo sua tendência, principalmente pelo método logarítmico, sem uma análise mais apurada. Os autores afirmam que para águas baixas, qualquer método é impreciso, devido à instabilidade dos leitos naturais nesses períodos. A recomendação é a medição de descarga para se evitar a extrapolação inferior.

Fill (1987) também chama a atenção para o equívoco de se confiar em demasia numa medição única em cotas elevadas. São comuns erros de medição em tais situações, devido em geral, às condições desfavoráveis e perigosas em que são efetuadas. O mesmo autor é categórico em afirmar que nenhum processo de extrapolação substitui efetivamente a realização de medições de vazão em cotas altas, sendo a única maneira de se eliminar, de forma definitiva, as dúvidas sobre o traçado da curva-chave.

Capítulo IV – Metodologia

4.1 – Dados gerais das estações fluviométricas

Todos os dados utilizados nesse trabalho são oriundos do Cd-rom de 1998 de dados hidrológicos não consistidos (Brasil, 1998), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Com maior ou menor relevância na qualidade e confiabilidade das curvas-chave correspondentes, essas informações encontram-se condensadas na Tabela A.1 do Anexo A, juntamente com a explicação sobre cada coluna apresentada. No mesmo anexo encontram-se cinco histogramas de apoio na visualização de alguns desses dados por estação: áreas de contribuição, número de medições utilizadas, amplitude das cotas máximas e mínimas do total de medições utilizadas, vazões mínimas e vazões máximas medidas.

Em praticamente todas as estações fluviométricas utilizadas nesse trabalho, as medições de vazão foram feitas a partir de barco com cabo estendido, visto que em condições normais os rios dessa região têm largura máxima entre 200m e 300m. As exceções são as medições feitas a vau, em alguns cursos d'água nos períodos de estiagem, ou aquelas feitas por cabo aéreo levando o hidrometrista ou com teleférico semi-automático, nos períodos de cheia onde a estação dispõe dessa estrutura instalada.

A grande maioria das medições feitas nas estações analisadas nesse trabalho, utilizou o molinete do tipo A. Ott, até 1969 e A. Ott e Gurley, após esta data, fruto de convênio firmado entre DNAEE e USGS (United States Geological Survey) (Marques, 2001).

Neste trabalho não serão considerados os erros nas medições de vazão. No entanto as diferenças entre os valores obtidos nas extrapolações e a curva-chave, nas estações que possuem apenas uma medição isolada na extremidade superior do gráfico, devem ser analisadas com mais cuidado, uma vez que as incertezas na medição da vazão nesse ponto pode deslocar todo segmento superior da curva-chave alterando sensivelmente as diferenças nas extrapolações.

4.2 - Seleção das Estações Fluviométricas

Dentre as inúmeras estações fluviométricas disponíveis optou-se por trabalhar com as estações dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, devido ao fato da familiarização adquirida pelo pesquisador com as características hidrogeomorfológicas destas bacias, em visitas feitas as estações dessa região quando de sua participação em projeto de consistência de dados hidrológicos para a ANEEL no ano de 1999. Além disso, nota-se nas estações

fluviométricas dessa região, a problemática frequente da extrapolação superior da curva-chave (Beltrame et al., 2000), devido as características de relevo acentuado, que resulta em altas velocidades no escoamento e cheias mais rápidas, que dificultam as medições.

A primeira triagem das estações englobou 266 estações das bacias nº 7, nº 8 e sub-bacia nº 65, conforme a Figura 4.1, segundo código do antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (Brasil, 1981), adotado pela ANEEL.



Figura 4.1– Bacias nº 7 e 8. (Fonte: www.aneel.gov.br).

A seguir foram excluídas 166 estações dessas 266, segundo os critérios nessa ordem:

- 1 – excluídas as estações que não possuíam ou não foi possível acessar os dados de pelo menos um perfil transversal da seção, informação essencial para a extrapolação em todas as metodologias analisadas exceto a Logarítmica (total de 61 estações);
- 2 – excluídas as estações com menos de 20 medições de vazão, salvo casos em que havia um bom alinhamento e equidistância entre os pontos (total de 13 estações);
- 3 – excluídas as estações com uma amplitude de cotas medidas menor que 2,0 m (total de 29 estações);
- 4 – excluídas as estações com uma sensível dispersão dos pontos no gráfico (critério visual), evidenciando acentuado efeito de remanso ou forte instabilidade da seção transversal (total de 63 estações);

4.3 – Calibragem das curvas-chave

Selecionadas as estações em condições de serem utilizadas, num total de 100, fez-se uma pré-organização dos dados para o início da manipulação dos mesmos da forma mais sistemática possível por tratar-se de um volume considerável de informações. Foram separados, utilizando-se o programa MSDHD, os dados de medição de vazão de cada estação, a partir dos

arquivos de extensão RSM e convertidos para a planilha eletrônica renomeados com o código da estação, também segundo critério da ANEEL. Cada planilha contém uma tabela como a exemplificada na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Exemplo dos dados das medições de vazão preparados para cada estação.

Estação:	URUGUAIANA		Código	77150000	Entidade:	DNAEE	
Rio:	RIO URUGUAI		Drenagem	163547	Latitude	29 45 00	
Local:	URUGUAINA		UF:	RS	Longitude	57 05 00	
DATA	MEDIÇÃO	COTA	VAZÃO	ÁREA	LARG	PROFD	VELOC
29/12/1982	1	389	3567	4730	1200	3,94	0,754
27/01/1983	2	245	1980	3320	1191	2,79	0,596
11/03/1983	3	903	13600	11972	1417	8,45	1,136
19/03/1983	4	803	11500	10280	1355	7,58	1,118
...
02/12/1997	55	650	8854	8060	1350	5,97	1,099
19/02/1998	56	997	17319	13054	1400	9,32	1,327
01/06/1998	57	500	5814	6464	1350	4,79	0,899

Foram calibradas as curvas-chave das estações escolhidas de acordo com roteiro proposto por Jacon e Cudo (1987). Utilizou-se como apoio nessa tarefa o programa *Grafchav*, desenvolvido pela Coordenação de Programa de Pós-graduação de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Este programa permite ajustar-se aos pontos do gráfico QxH , uma equação em forma de potência como aquela apresentada na equação 2.1. Utilizando o método dos mínimos quadrados o programa determina os parâmetros: a , n e H_o de forma automática, desde que fornecido um valor de H_o inicial, ou de forma manual, caso o ajuste automático não seja considerado satisfatório (Grafchav, 1996).

Pode-se também dividir, automática ou manualmente, as medições por faixa de cota em até 3 segmentos, obtendo-se uma equação para cada faixa, de forma a se conseguir um melhor resultado final no ajuste da curva-chave. Dessa forma foram calibradas 44 estações utilizando exclusivamente este programa.

Quando o programa *Grafchav* não fornecia um bom ajuste a todo conjunto de medições, utilizou-se a planilha eletrônica que ajusta uma *linha de tendência* aos pontos do gráfico através do método dos mínimos quadrados (Lapponi, 1997). Dentre as seis opções de ajuste disponíveis, as utilizadas foram: ajuste linear, exponencial, potência e polinomial de segundo grau. Note-se que essa ferramenta foi utilizada nas faixas de cota onde o programa *Grafchav*

não permitiu um bom ajuste. Dessa forma foram calibradas 18 estações. Outras 3 estações foram calibradas utilizando-se exclusivamente essa ferramenta.

Das 35 estações restantes, no entanto, não foi possível um ajuste total por equação(ões), sendo necessário, em toda a extensão das cotas medidas ou em parte destas, um ajuste gráfico resultando numa Tabela de Calibragem. A Tabela 4.2 mostra o número de estações calibradas pelas respectivas ferramentas utilizadas nesse trabalho.

Tabela 4.2 – Ferramentas de calibragem das curvas-chave.

Ferramenta de Calibração da Curva-chave	Nº de Estações calibradas	Total
Grafchav (equação)	44	65
Grafchav e Planilha eletrônica (equação)	18	
Planilha eletrônica (equação)	3	
Gráfico (tabela)	21	35
Gráfico e Grafchav (tabela)	13	
Gráfico e Planilha eletrônica (tabela)	1	

4.4 – Escolha e classificação do Perfil da Seção Transversal

Via de regra tinha-se disponível de um a oito levantamentos de perfis transversais, caracterizando de duas a quatro seções de medição distintas para cada estação. A necessidade de se adotar uma seção para aplicação dos métodos de extrapolação levou à definição de critérios para escolha:

1. seção cujo levantamento tenha sido feito preferencialmente dentro do período de medições adotado para calibragem da curva, minimizando diferenças causadas pela mobilidade do leito;
2. seção cuja seqüência dos levantamentos tenha mostrado uma menor tendência a mobilidade do leito;
3. seção cujas cotas das margens ultrapassam a cota mais alta medida, permitindo a maior faixa de pseudo-extrapolação possível.

Outro critério de desempate entre duas ou mais seções foi a comparação da A_m da seção medida em campo, para uma determinada cota, com a A_m calculada para a mesma cota.

Nos casos onde, apesar dos critérios de escolha, ainda pairavam dúvidas sobre qual seção escolher, optou-se em aplicar as metodologias nas duas seções prorrogando a escolha para uma fase posterior.

Uma vez escolhida a seção, os dados referentes ao seu levantamento foram adicionados ao arquivo da estação fluviométrica correspondente e gerado o gráfico da seção no padrão mostrado no exemplo da Figura 4.2.

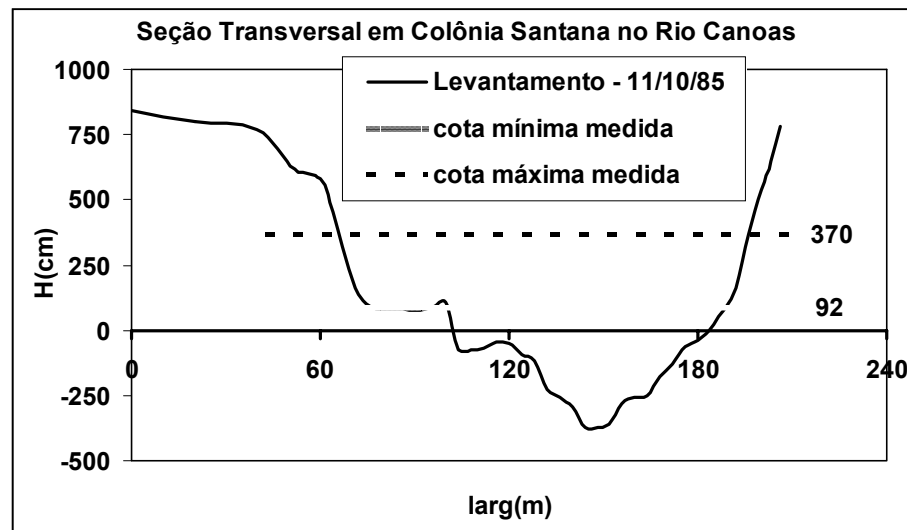


Figura 4.2– Gráfico do perfil da seção transversal da estação Passo do Prata no rio da Prata.

Nota-se na mesma figura a diferença de escala entre os eixos de cota (cm) e largura do rio (m), diferença adotada propositadamente para realçar o desenho do perfil. A legenda do gráfico mostra a data de realização do levantamento da seção e as cotas máxima e mínima medidas no período de medições adotado.

O passo seguinte foi classificar as estações a partir da geometria das seções, uma vez que o fator geométrico está presente em três dos quatro métodos de extrapolação analisados. Optou-se por uma classificação simples e puramente visual na expectativa de se encontrar uma correlação entre a forma das seções e os resultados obtidos das extrapolações por metodologia. Para tal foi necessária a impressão das seções de todas as estações escolhidas buscando-se padrões na geometria. Cabe observar que essa análise foi feita na geometria da seção contida apenas entre as cotas máximas e mínimas medidas, definidas pelas linhas tracejada e cinza no exemplo da Figura 4.2, já que todas medições utilizadas e a pseudo-extrapolação serão feitas nesses limites.

Quatro padrões de seções transversais foram definidos e nomeados segundo as siglas:

SE – seções com extravasamento da calha menor – casos em que as medições superiores ocorreram fora da calha menor do rio. Fato evidenciado pela forma da seção e/ou pelo traçado da curva-chave (Figura 4.3.A).

SS – seções simples – casos em que as laterais da seção não possuem mudanças de inclinação ou singularidades significativas (Figura 4.3.B).

SG – seções com singularidades simples – casos em que pelo menos uma das laterais da seção possui uma singularidade significativa (Figura 4.3.C). Singularidade é entendida aqui como o alargamento ou estreitamento da seção transversal, causado pela mudança de inclinação da(s) margem(ens) que provoca uma descontinuidade na curva-chave.

SC – seções complexas – casos em que pelo menos uma lateral da seção não se encaixa nos critérios das categorias anteriores (Figura 4.3.D).

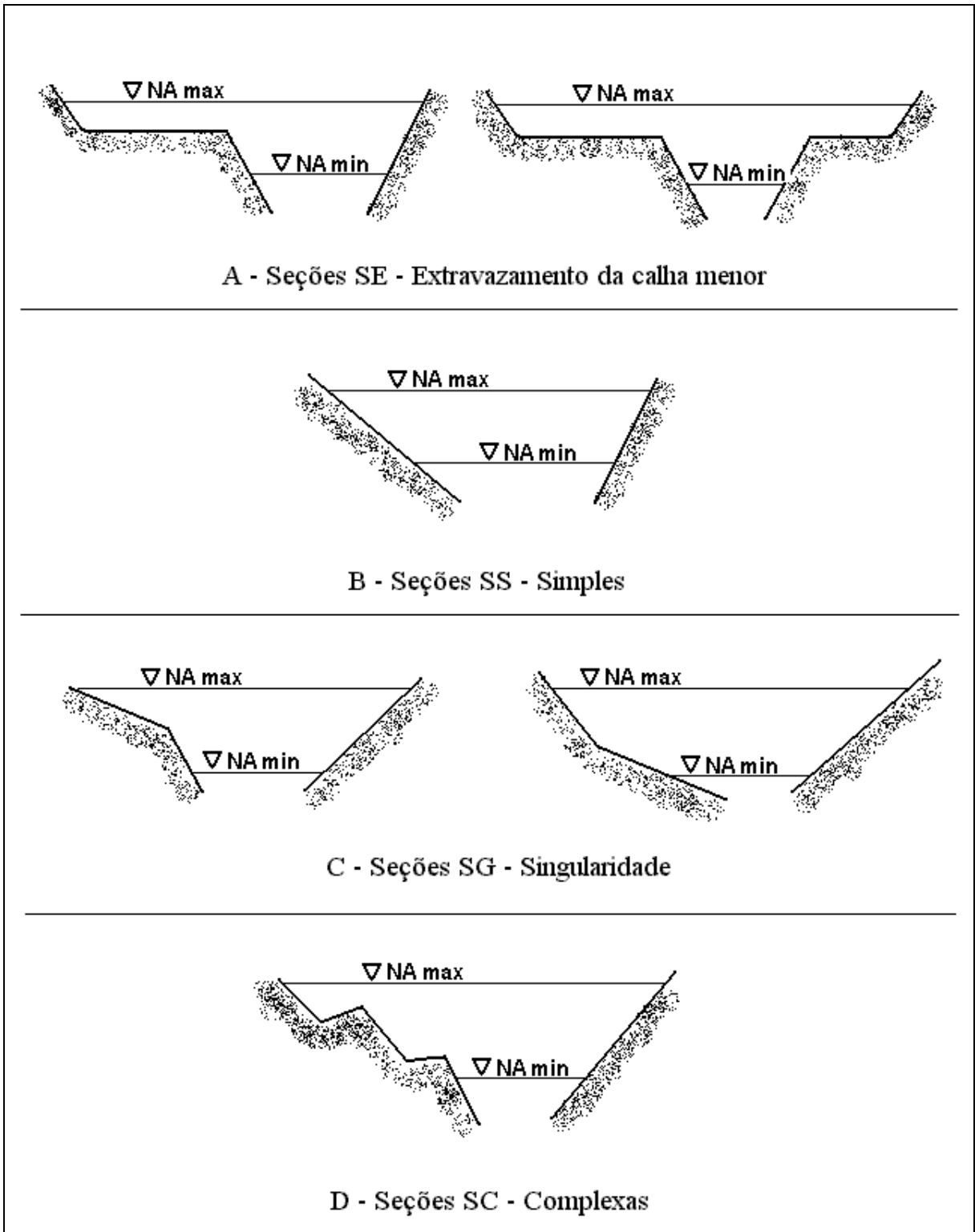


Figura 4.3 – Exemplo esquemático dos padrões de seção transversal adotados.

4.5 – Metodologia de Pseudo-Extrapolação

Denominou-se de *Pseudo-Extrapolação* a metodologia utilizada para aplicação e posterior avaliação dos métodos de extrapolação superior de curva-chave. Essa metodologia foi proposta e desenvolvida neste trabalho, consistindo nas seguintes etapas:

1. traçado e calibragem da curva-chave de forma criteriosa dentro da faixa total de cotas medidas - utilizou-se para tal o roteiro proposto por Jacon e Cudo (1987). Como ferramentas de apoio utilizou-se o programa Grafchav, ajustando-se uma equação do tipo $Q = a (H - H_o)^n$, além da planilha eletrônica e do ajuste gráfico, como foi descrito no item 4.3;
2. desconsideração das medições superiores da faixa total de cotas medidas, denominada de *faixa de pseudo-extrapolação*, e aplica-se os métodos de extrapolação nessa faixa, com base apenas nas medições inferiores (*faixa base*) – utilizou-se como valor de referência na divisão das duas faixas a cota mais próxima à metade da faixa total de cotas medidas;
3. comparação das vazões estimadas pelas pseudo-extrapolações, com as vazões determinadas pela curva-chave total inicialmente traçada.

A principal limitação dessa metodologia deve-se ao fato de que o comportamento geométrico e hidráulico da seção acima da faixa de cotas medidas (extrapolação real) pode diferir muito em relação a faixa de cotas da pseudo-extrapolação. Esse fato não pode ser de forma alguma desconsiderado. Essa metodologia deve ser utilizada como uma ferramenta de apoio no estudo de extrapolação da curva-chave e não como o indicador final na escolha deste ou daquele método a ser adotado.

A metodologia proposta de pseudo-extrapolação foi aplicada aos quatro métodos de extrapolação propostos: Logarítmico, Stevens, Manning, Velocidade x Área, como serão mais bem detalhados a seguir.

É importante frisar que o presente trabalho buscou aplicar dentro do possível esses quatro métodos em todas as estações selecionadas, a despeito das condições necessárias à aplicação de cada método, na tentativa de verificar a importância de se atender a essas condições a partir das incertezas ou erros calculados. O que motivou esse procedimento é o fato de que a maioria das estações fluviométricas em operação no país não atende certas exigências hidrológicas ou faltam recursos para investir na obtenção de outras informações fundamentais na aplicação de métodos mais precisos.

À medida que as metodologias foram sendo aplicadas, observou-se a possibilidade de novos ajustes no caso dos métodos de Manning e Velocidade x Área, que resultou no desdobramento desses métodos em duas variações, totalizando seis métodos diferentes. A seguir uma descrição da forma de aplicação de cada método e suas eventuais variações.

4.5.1 – Método Logarítmico (LOG)

Na aplicação do método Logarítmico, calibrou-se uma nova curva-chave apenas para as medições da faixa base, utilizando-se dos mesmos critérios e ferramentas de calibração da curva-chave total. Nesse caso ajustou-se obrigatoriamente uma equação do tipo $Q = a (H - H_0)^n$, com o auxílio do programa Grafchav. A aplicação do método consistiu no prolongamento da equação ajustada, às cotas da faixa de pseudo-extrapolação. Nos casos em que se ajustou mais de uma equação à faixa base, prolongou-se a última equação. Na Figura 4.4 tem-se um exemplo de como as medições superiores podem desviar ou não a curva-chave total da pseudo-extrapolação feita a partir da faixa base.

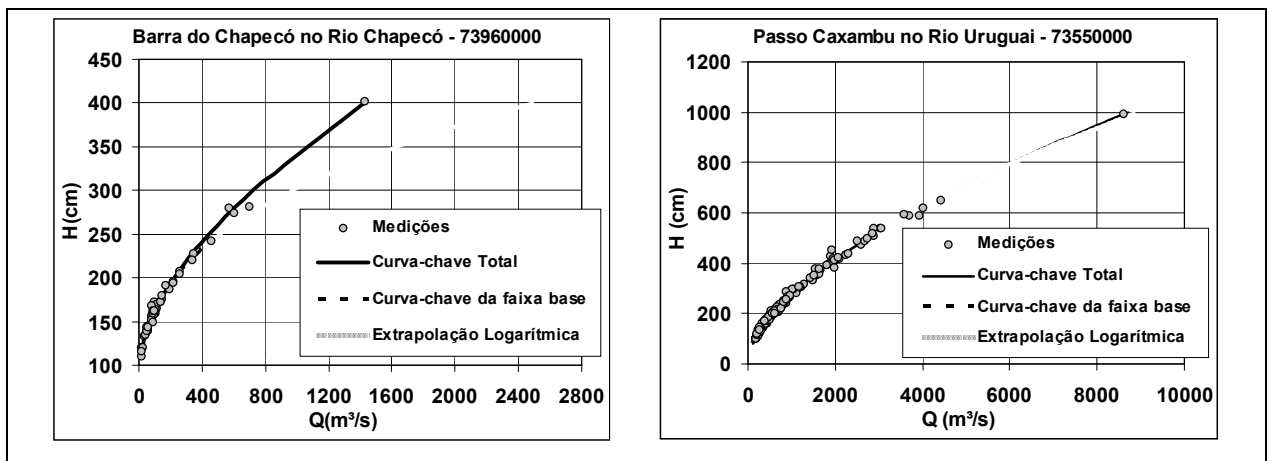


Figura 4.4 - Exemplos do método Logarítmico na extrapolção da curva-chave.

4.5.2 – Método de Stevens (Stv)

A partir de A_m e R_h calculados para cada cota medida, gerou-se, utilizando-se da planilha eletrônica, o gráfico de apoio: $A_m R_h^{1/2} x Q$, para a faixa base e ajustou-se uma *linha de tendência (linear)* aos pontos extremos do gráfico que definem uma reta, obtendo-se uma função de $Q=f(A_m R_h^{1/2})$, fornecida pela própria planilha. A função obtida aplicada ao produto de $A_m R_h^{1/2}$, referente à faixa de pseudo-extrapolação, forneceu os valores das vazões. Na Figura 4.5 nota-se a opção pela divisão do gráfico em dois ou mais trechos quando era evidente a mudança na inclinação dos pontos (Colônia Santana); caso contrário ajustou-se uma única reta aos pontos (Rio do Sul).

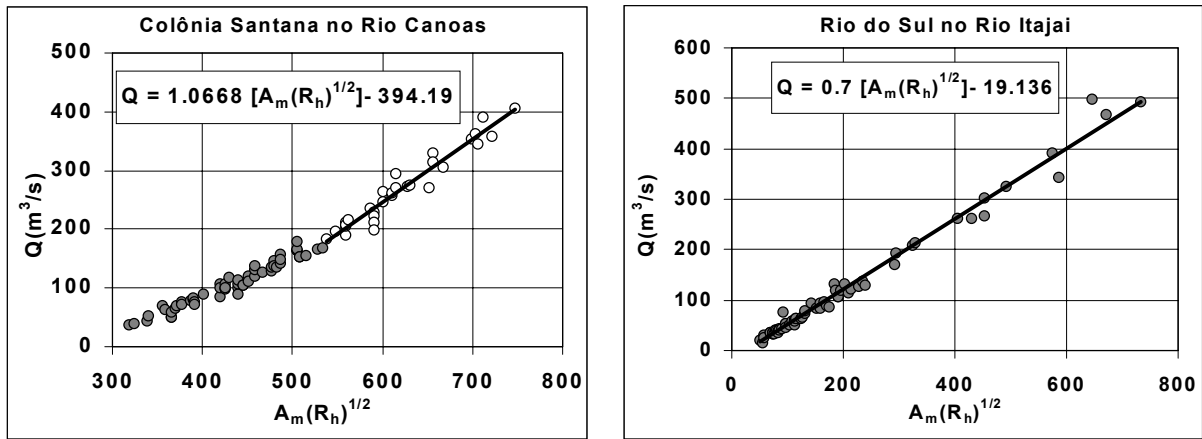


Figura 4.5 - Exemplos da obtenção de $Q=f(A_m R_h^{1/2})$ no método de Stevens.

4.5.3 – Método de Manning (Man)

Calculou-se K_m para cada medição da faixa base a partir da equação 4.1:

$$K_m = \frac{Q}{A_m R_h^{2/3}} \quad 4.1$$

onde A_m e R_h calculados para cada cota medida na faixa base utilizando-se rotina de cálculo em linguagem Fortran.

Nesse caso o método foi aplicado de duas formas:

- a primeira forma, tradicional, aqui denominada *Manning Fix (Man Fix)*, estima-se um valor único de K_m a ser aplicado em toda a faixa de pseudo-extrapolação. Devido à falta de uma assintoticidade bem definida da curva $K_m \times H$ na faixa base e a falta de informações de campo para uma estimativa mais precisa, adotou-se o critério de fixar K_m no valor que fizesse coincidir o início da curva de pseudo-extrapolação com o final da curva-chave na faixa base. A adoção desse critério fez com que se optasse por outro nome para o método e não simplesmente *Manning*;
- a segunda forma, alternativa, denominada *Manning Log (Man Log)*, com o auxílio da planilha eletrônica gerou-se o gráfico de apoio: $H \times K_m$, para a faixa base e ajustou-se uma *linha de tendência (logarítmica)* ao total dos pontos ou aos pontos extremos do gráfico (Figura 4.6), que melhor caracterizasse a tendência final. A função obtida, de $K_m=f(H)$, aplicada à faixa de pseudo-extrapolação, fornece o valor de K_m para cada cota.

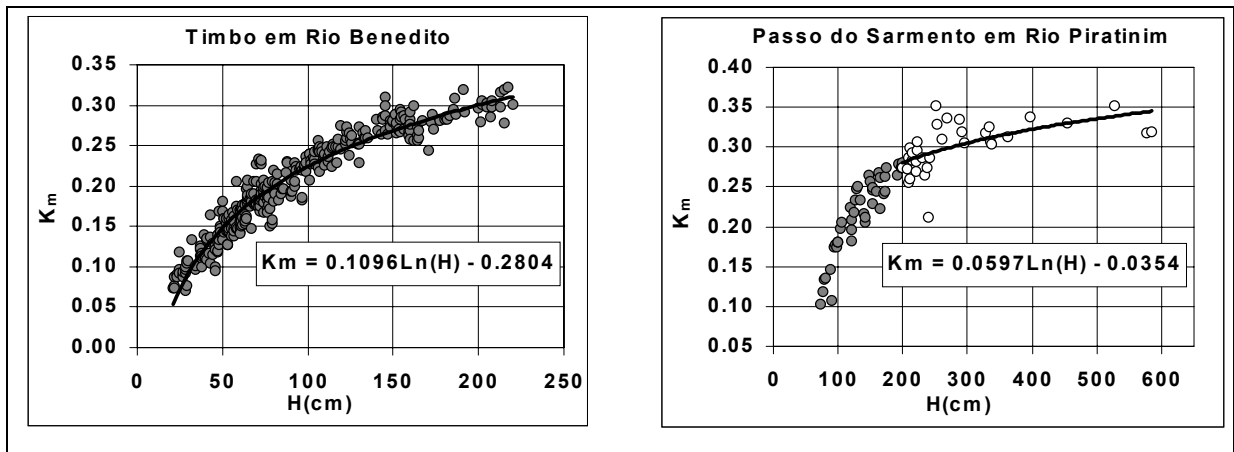


Figura 4.6 – Exemplos da obtenção de $K_m = f(H)$ no método Manning-Log.

Em 16 estações a forte dispersão dos pontos não justificava qualquer tipo de ajuste de linha de tendência, inviabilizando a aplicação desta variante proposta para o método de Manning.

Os valores de K_m fixo ou variável por cota, aplicados à equação $Q = K_m \cdot A_m \cdot R_h^{1/2}$, para cada cota da faixa de pseudo-extrapolação, forneceram os valores das vazões.

4.5.4 – Método de Velocidade x Área (VxA)

Com a velocidade média calculada com base nas vazões medidas e nas A_m calculadas para as cotas referentes a essas vazões, traça-se o gráfico de apoio: HxV , para a faixa base. A partir desse ponto a metodologia também foi aplicada conjuntamente de duas formas com o auxílio da planilha eletrônica:

- na primeira, denominada *VxA*, ajustou-se uma *linha de tendência Linear* aos pontos extremos do gráfico que definem uma reta, obtendo-se uma função de $V=f(H)$, fornecida pela própria planilha (Figura 4.7). A função obtida aplicada às cotas da faixa extrapolada forneceu os valores da velocidade média que, multiplicada pela A_m calculada para a cada cota, resulta nas vazões extrapoladas;
- na segunda, denominada *VxA Log*, o cálculo é o mesmo a não ser pelo ajuste de uma *linha de tendência Logarítmica* aos pontos extremos do gráfico. Tal procedimento foi motivado pela constatação de que, em muitas estações, o gráfico de HxV aproximava-se de uma curva logarítmica. Eventualmente, o bom ajuste do gráfico a uma reta não justificava a aplicação desse procedimento, fato que ocorreu em 31 das 70 estações onde essa variante do método foi aplicada.

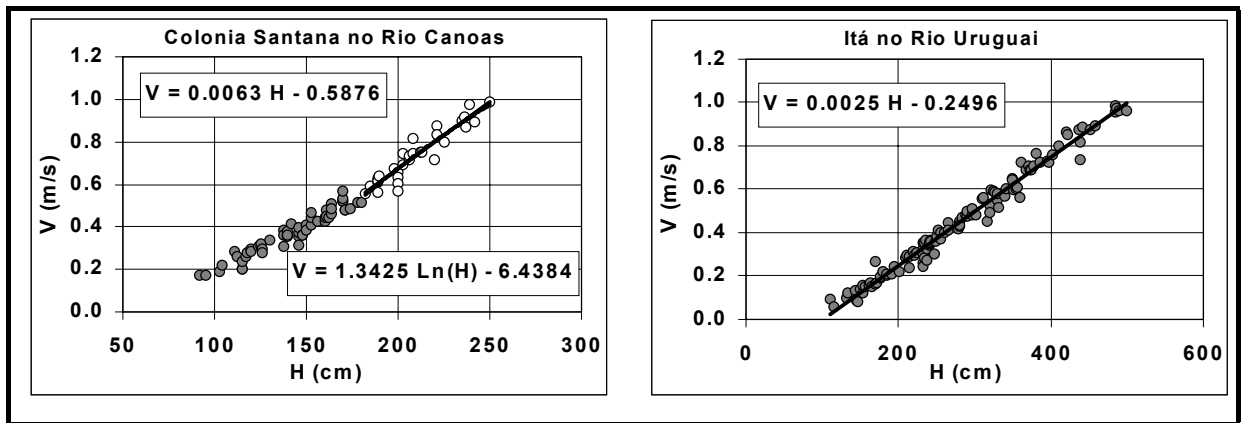


Figura 4.7 – Exemplo da obtenção de $V=f(H)$ pelo método da Velocidade x Área.

4.6 – Problemas na aplicação dos métodos propostos.

Duas situações impediram a aplicação dos métodos de extrapolação propostos nesse trabalho: a dispersão dos pontos nos gráficos de apoio e a distorção causada na extrapolação em função do R_h .

No primeiro caso, a forte dispersão dos pontos nos gráficos de apoio à aplicação dos métodos: $A_m R_h^{1/2} \times Q$ para Stevens; $H \times K_m$ para Manning Log e $H \times V$ para VxA e VxA Log não permitiu a aplicação dos mesmos. A Figura 4.8 exemplifica dois casos onde preferiu-se não aplicar as metodologias devido a forte dispersão dos pontos nos gráficos, representados pelo coeficiente e correlação R^2 .

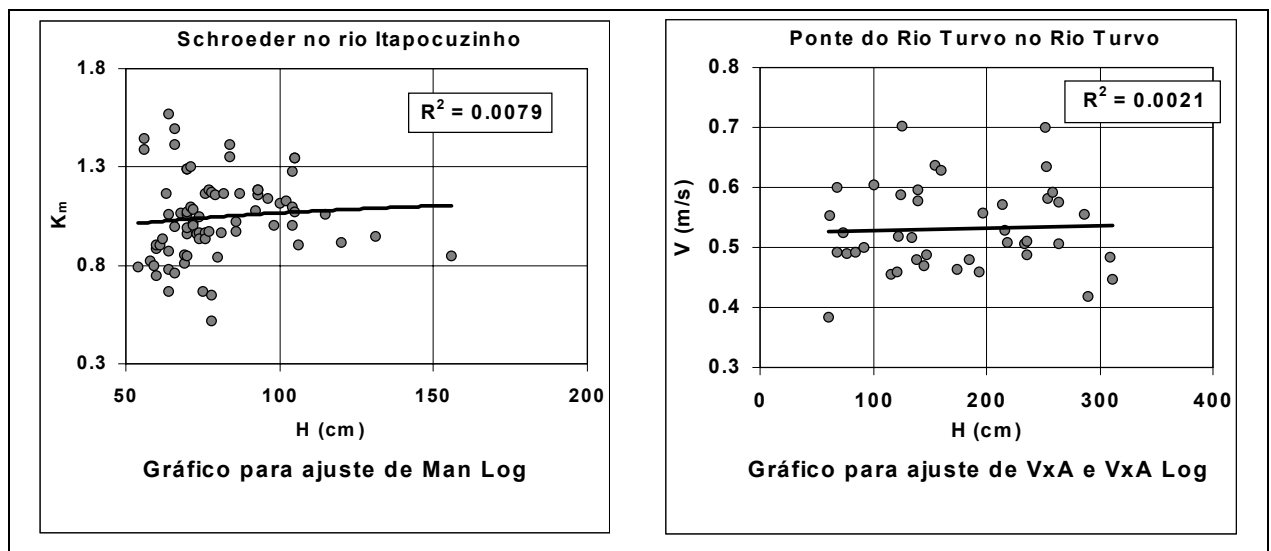


Figura 4.8 – Exemplos de gráficos de apoio com forte dispersão.

No segundo caso as vazões calculadas nos métodos de extrapolação por Stevens e Manning (Fix e Log) são diretamente dependentes da variável Raio Hidráulico (R_h). Disso resulta que as perturbações que ocorrem com essa variável, principalmente no caso de

alargamento brusco da seção transversal (planícies de inundação), são automaticamente transferidas para a vazão calculada como mostra o exemplo da Figura 4.9. Esse efeito não tem correspondência física, só ocorrendo analiticamente, no cálculo da vazão.

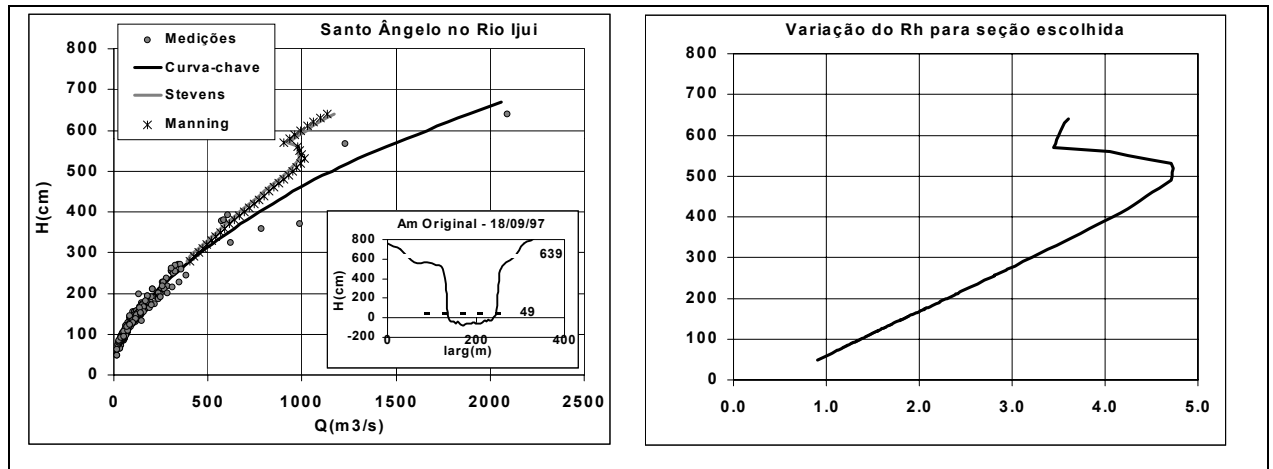


Figura 4.9 - Exemplo da influência de R_h nos métodos de Stevens e Manning (Fix e Log).

A bibliografia recomenda, no caso da extrapolação por Stevens (item 3.1.2), não se utilizar desse método nos casos de singularidades na faixa de cotas extrapoladas e, no caso da extrapolação por Manning, se utilizar o método apenas quando for possível decompor a seção em subseções (item 3.2).

4.7 – O problema das múltiplas seções de medição ($A_m Cal \times A_m Med$)

Um empecilho comum na aplicação dos métodos de Stevens, Manning e VxA deve-se ao fato das medições de vazão serem executadas, invariavelmente, em seções diferentes numa mesma estação, o que afeta a variável Área Molhada (A_m), que direta ou indiretamente afeta os gráficos necessários a aplicação dos métodos: $A_m R_h^{1/2} \times Q$, no caso de Stevens (Figura 4.10); $H \times K_m$, no caso de Manning (Figura 4.11) e $H \times V$ no caso de VxA (Figura 4.12).

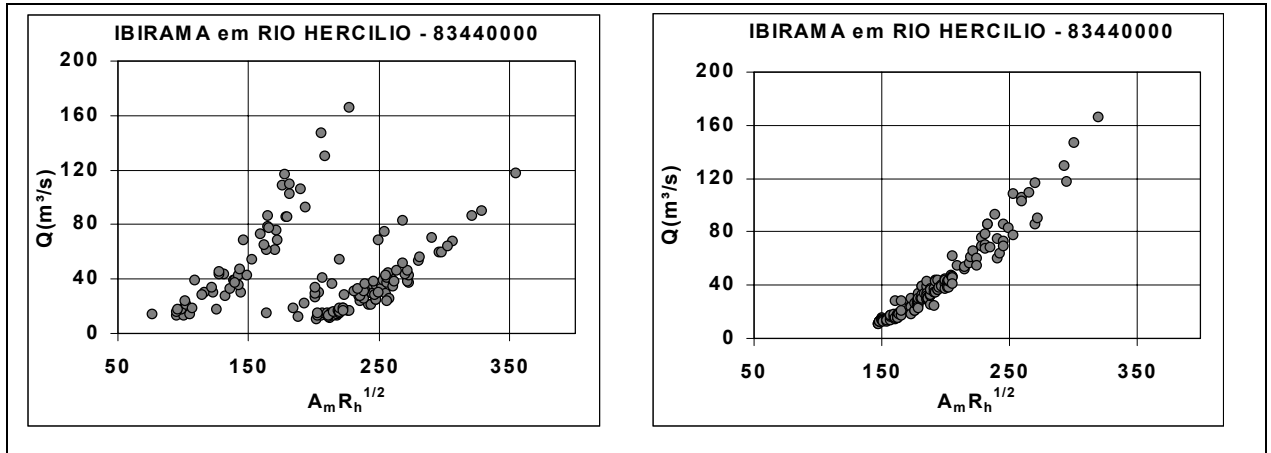


Figura 4.10 – $A_m R_h^{1/2}$ a partir de A_m medida em campo (esquerdo) e A_m calculada (direito).

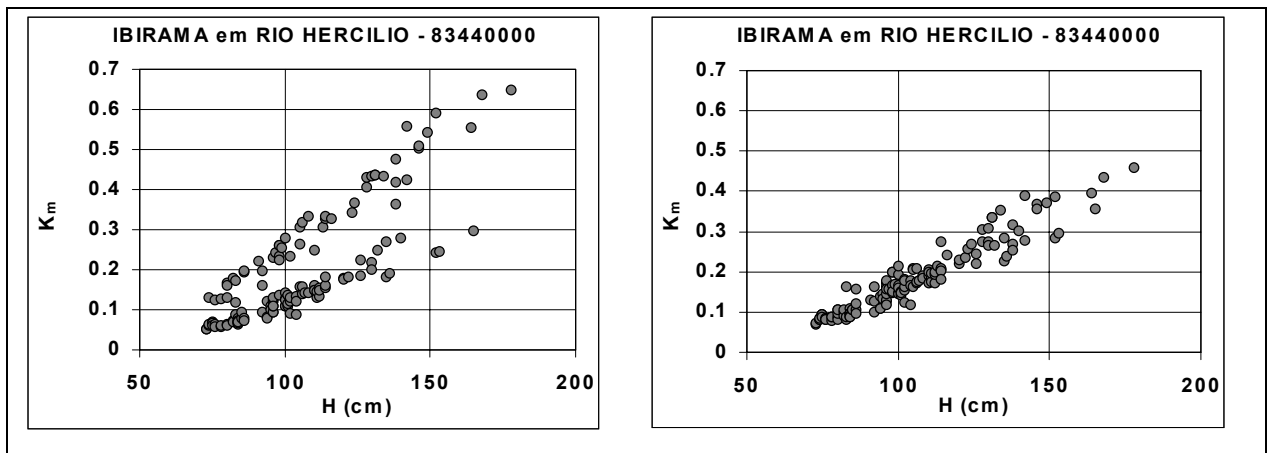


Figura 4.11 – K_m a partir de A_m medido (esquerdo) e K_m a partir de A_m calculado (direito).

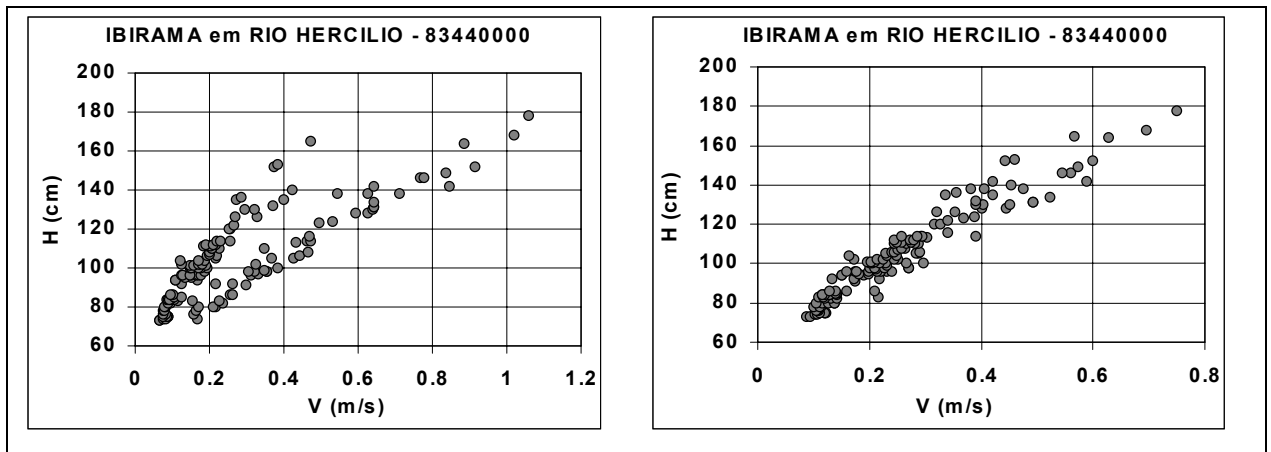


Figura 4.12 – Velocidade medida em campo (esquerdo) e velocidade calculada (direito).

São propostas três formas de se contornar o problema:

A primeira solução seria identificar entre as medições disponíveis quais são aquelas referentes ao perfil da seção transversal escolhida, utilizando-se apenas essas medições na aplicação dos métodos. Tal fato, porém, tornar-se-ia complicado, uma vez que os arquivos de medições de vazão disponíveis não contêm essa informação. Seriam necessárias as fichas de

campo de cada medição, das quais não se dispunha, relacionando-as a uma seção. No caso das 100 estações escolhidas, seriam mais de 14.000 medições a se identificar.

A segunda solução seria, baseado no perfil transversal da seção escolhida, calcular a área molhada para uma das cotas medidas ($A_m Cal$). Em seguida separar-se-iam as medições, supostamente referentes a este perfil, por aproximação com a área molhada medida em campo ($A_m Med$). Por fim, utilizar-se-iam as variáveis medidas em campo (H, Q, A_m e V) somente dos pontos selecionados, na aplicação das metodologias de extrapolação. Cabe lembrar a necessidade de se fixar um limite na diferença entre $A_m Med$ e $A_m Cal$, para a escolha das medições a serem utilizadas. Na análise comparativa desta solução, com a terceira, o valor máximo estipulado foi de +/- 20%. Esta solução foi denominada $A_m Med$.

A terceira solução proposta é calcular a área molhada, a exemplo da proposta anterior, para todas as cotas medidas e utilizar esses valores calculados em substituição as áreas medidas em campo para todos os pontos da faixa base. A velocidade necessária no método Velocidade x Área também seria calculada com base em $A_m Cal$ e na vazão medida para todas as medições indistintamente. Esse procedimento é razoável, admitindo-se que as seções estejam próximas o suficiente para que a declividade da linha d'água seja considerada a mesma, e que a contribuição do escoamento superficial nas margens do trecho entre as seções seja desprezível, situações perfeitamente aceitáveis. Esta solução foi denominada $A_m Cal$.

Após análise comparativa das soluções $A_m Med$ e $A_m Cal$, aplicadas nas pseudo-extrapolações de 14 estações escolhidas aleatoriamente e de forma proporcional aos 4 tipos de seções padrão estipuladas, a solução adotada para as 100 estações foi a $A_m Cal$. A base dessa decisão será melhor detalhada adiante, no item 5.1, após descrição dos critérios de comparação dos métodos analisados.

4.8 – Ajuste da pseudo-extrapolação à curva-chave

Na Figura 4.13 nota-se que não há um ajuste ou continuidade perfeita das pseudo-extrapolações e com curva-chave na faixa base. Isso acontece de forma mais ou menos acentuada devido à dispersão dos pontos nessa faixa que induzem a extrapolação em direções diferentes daquelas onde os pontos da faixa de pseudo-extrapolação determinam a curva-chave.

Na prática esse ajuste seria feito manualmente no segmento extrapolado, encaixando-o da maneira mais suave possível à curva-chave. Devido ao tratamento automatizado que foi dado ao trabalho, em função do número de estações envolvidas, optou-se em manter as pseudo-extrapolações sem tais ajustes. Essa descontinuidade reflete-se de forma analítica no valor do Erro Médio (Em), que será explicado no próximo item.

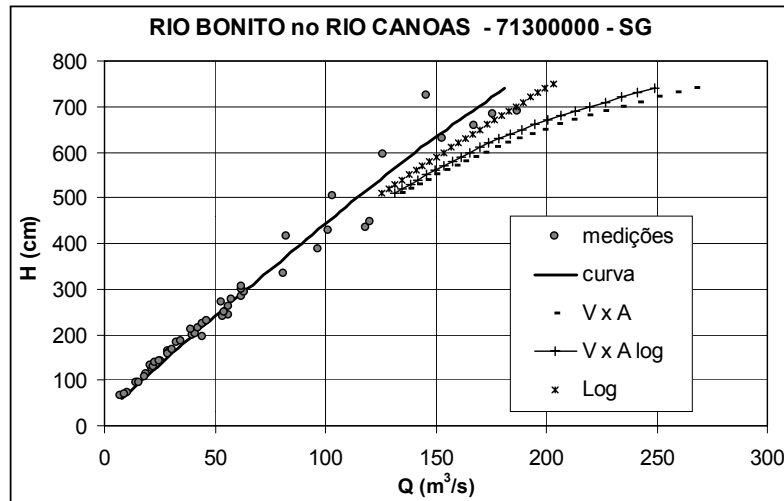


Figura 4.13 – Exemplo de descontinuidade entre curva-chave e pseudo-extrapolação.

4.9 – Critério de comparação

O passo seguinte à aplicação dos métodos de extrapolação propostos nas diversas estações foi o cálculo das diferenças entre as vazões estimadas pelos seis métodos analisados e a vazão calculada pela curva-chave total. Para tal, foram utilizadas as vazões calculadas de 10 em 10 cm de cota na faixa de pseudo-extrapolação.

Foram definidos dois tipos de diferenças ou erros, para auxílio na comparação entre os métodos. Para tornar esses valores proporcionais, permitindo compará-los entre estações completamente diferentes, as diferenças foram divididas pela máxima vazão obtida da curva-chave total, tornando os erros adimensionais.

A Figura 4.14 mostra esquematicamente uma curva-chave e sua pseudo-extrapolação por um método qualquer de extrapolação, juntamente com as variáveis utilizadas no cálculo das diferenças entre as vazões como pode-se observar nas equações seguintes.

4.9.1 - Erro na Cota Máxima (Eh_{max})

$$Eh_{max} = \frac{Q_{e_m} - Q_{c_m}}{Q_{c_m}} \quad 4.2$$

Onde: Q_{e_m} – vazão pseudo-extrapolada por uma dada metodologia, na cota máxima medida.

Q_{c_m} – vazão da curva-chave na cota máxima medida.

O cálculo deste erro permite quantificar uma sub ou super estimativa de cada metodologia na cota máxima extrapolada, visto ser o valor desta vazão uma referência no processo de extrapolação da curva-chave.

4.9.2 - Erro Médio (E_m)

$$E_m = \frac{\sum \left| \frac{Q_{e_h} - Q_{c_h}}{Q_{c_m}} \right|}{N_h} \quad 4.3$$

Onde: Q_{e_h} – vazão extrapolada na cota h por dada metodologia.

Q_{c_h} – vazão da curva-chave na cota h .

Q_{c_m} – vazão da curva-chave na cota máxima medida.

N_h - número de vazões calculadas na faixa de pseudo-extrapolação (10 em 10 cm).

Esse erro corresponde á média dos N_h erros da faixa extrapolada, calculados em intervalos de cota de 10 cm. Ele dá uma idéia de quanto a curva de pseudo-extrapolação está afastada da curva-chave em toda sua extensão.

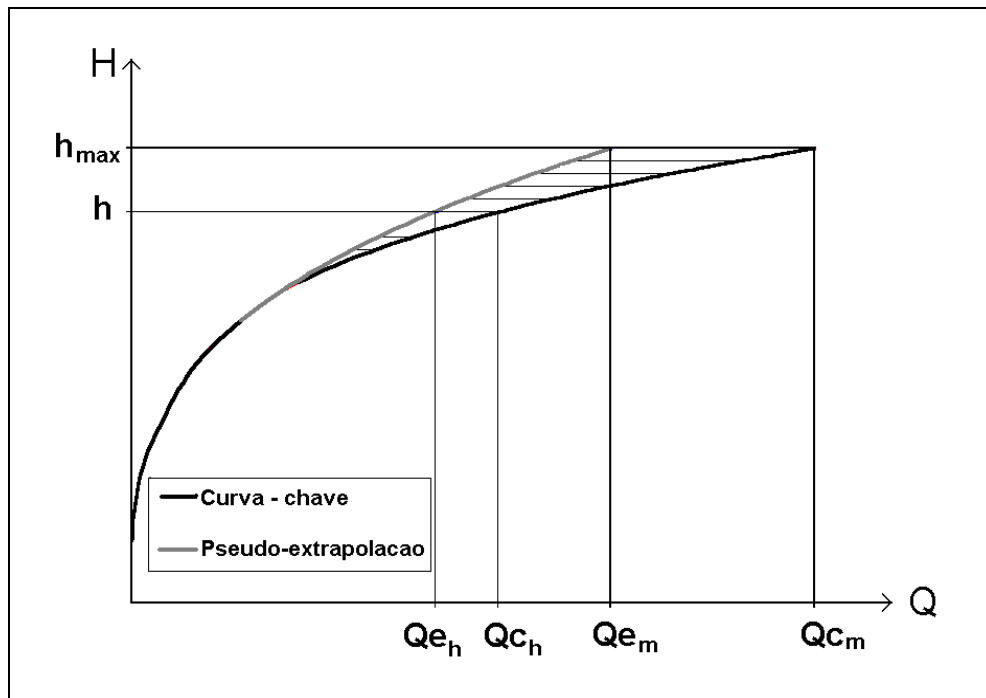


Figura 4.14 - Gráfico esquemático das diferenças entre as vazões.

Poder-se-ia ter feito a análise comparativa das metodologias sob a ótica das diferenças de cota ao invés das vazões. Por uma questão de opção e praticidade preferiu-se trabalhar com as vazões, uma vez que o programa Grafchav, ferramenta fundamental nesse trabalho, fornece a equação da curva-chave com a vazão em função da cota, reforçando a escolha pelas vazões.

Uma terceira possibilidade seria trabalhar com as diferenças de vazão e cota conjuntamente, porém, exigiria um duplo volume de cálculo que se entende desnecessário ao objetivo do o presente trabalho, sendo uma possibilidade para uma etapa seguinte de aprofundamento do tema.

Capítulo V – Resultados e Discussões

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados do presente trabalho. É importante lembrar que todas as curvas-chave traçadas, que servem de base para a comparação dos métodos de extrapolação, serão assumidas com o mesmo nível de confiança a despeito de se ter estações com melhores condições que outras.

Inicialmente serão apresentados os resultados e análises justificando a utilização da área molhada calculada ($A_m Cal$) no total das estações estudadas. Em seguida será feita uma análise por tipo de seção padrão e depois uma análise por metodologia de extrapolação.

5.1 - Justificativa para utilização da $A_m Cal$.

Para comparar os resultados entre o uso de $A_m Med$ e $A_m Cal$, buscou-se uma amostra de pelo menos 10% do número total das estações e dividida de forma proporcional aos 4 tipos de seção padrão. Desta forma foram escolhidas 14 estações sendo, 5 estações do tipo SG, 4 estações do tipo SS, 3 estações do tipo SC e 2 estações do tipo SE.

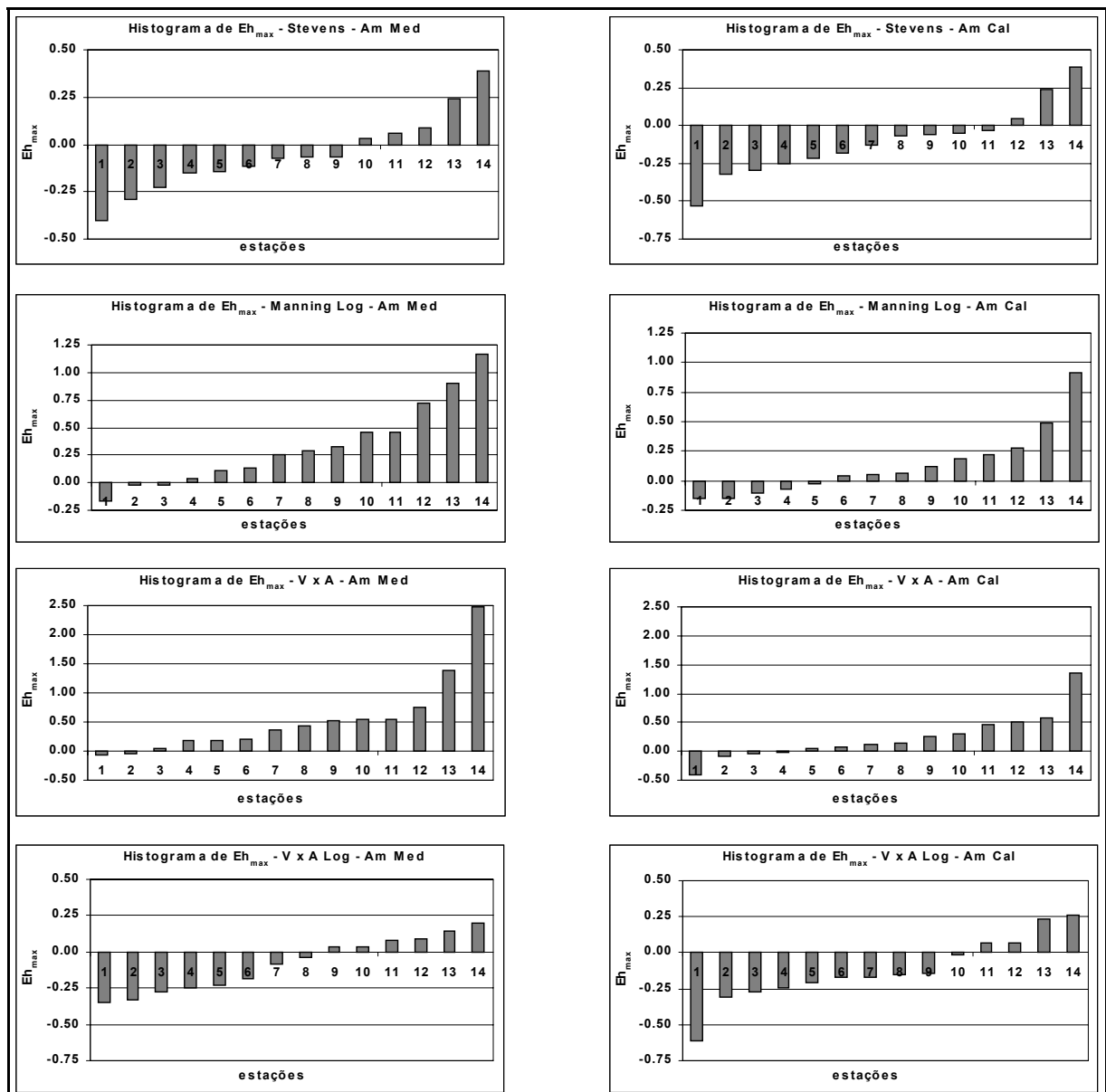
Aplicou-se a metodologia de pseudo-extrapolação utilizando-se as duas soluções e calculou-se os valores de Eh_{max} e Em para cada um dos métodos, cujos valores médios e seus respectivos desvios padrões, encontram-se nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2. A Figura 5.1 e Figura 5.2 mostram os valores de Eh_{max} e Em , por estação, na forma de histograma. Optou-se por esse formato, como auxílio nas análises, pois o mesmo permite que se compare e visualize o desempenho por método ou seção padrão. No caso de Eh_{max} os melhores métodos são aqueles onde os histogramas, tendem a cruzar o eixo das abscissas próximo ao meio do eixo, o que denota um equilíbrio entre o número de estações onde se superestimou ou subestimou a vazão na cota máxima. Além disso, quando mais próximo o gráfico se encontra do eixo das abscissas, menores as diferenças e melhor o método, o que vale para Em .

Nota-se que a análise apresentada compreende apenas os 4 métodos que sofrem efeito de A_m na determinação da vazão pseudo-extrapolada.

Analisando a Figura 5.1, percebe-se uma vantagem dos resultados obtidos em Eh_{max} com $A_m Cal$ nos métodos de **Manning Log** e **VxA**. Os métodos de **Stevens** e **VxA Log** ao contrário favorecem levemente o método $A_m Med$ como pode ser confirmado nos valores da Tabela 5.1, onde se tem valores médios de Eh_{max} (em módulo) das estações escolhidas. Isto ocorre por uma única estação cujo valor de Eh_{max} aumenta a média para esta solução.

Tabela 5.1 – Valores médios de Eh_{max} das 14 estações, para comparar A_m Med e A_m Cal.

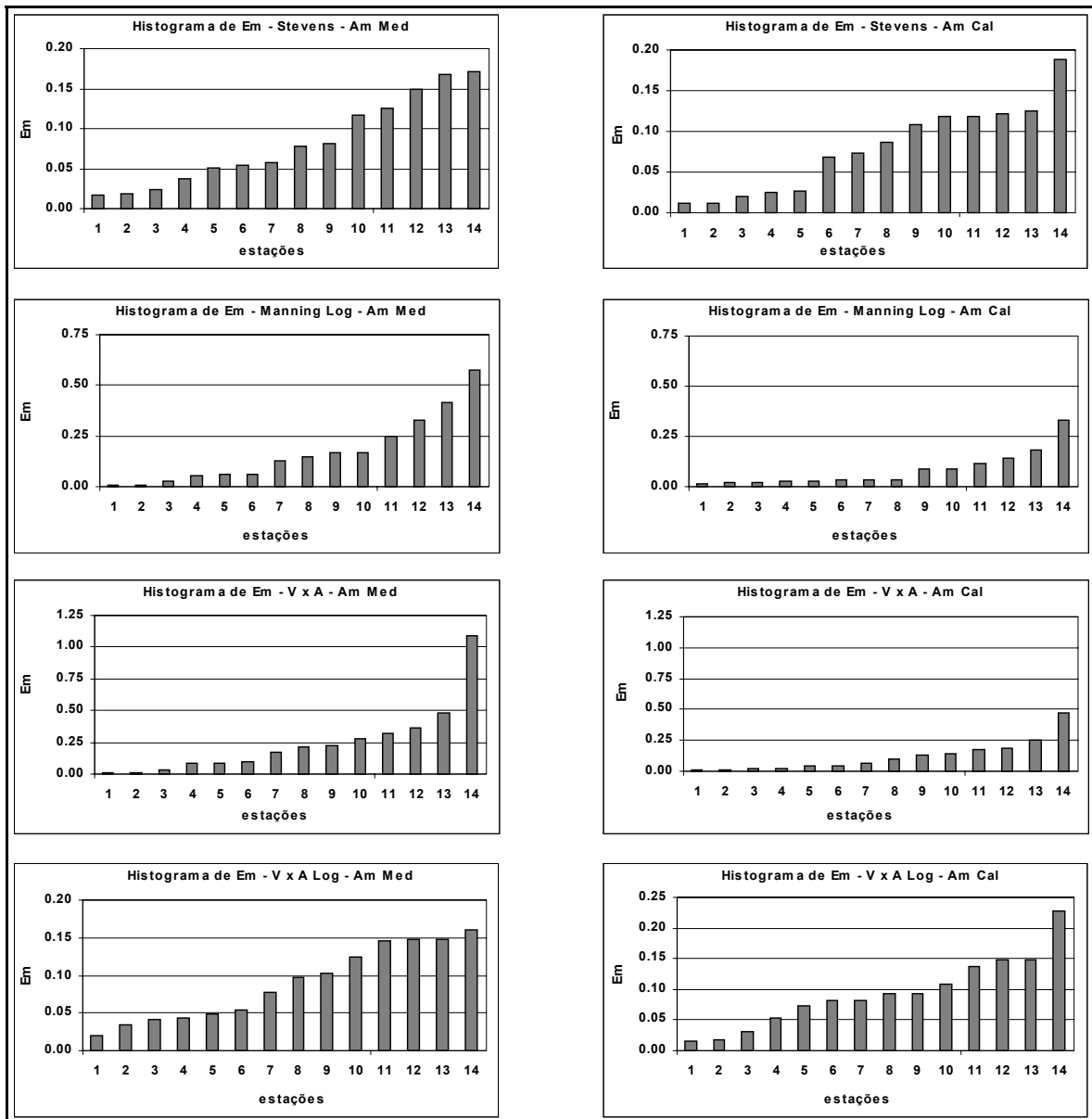
		Stevens	Man Log	VxA	VxA Log
A_m Cal	Média de Eh_{max}	0,201	0,205	0,313	0,290
	Desvio Padrão	0,149	0,237	0,358	0,144
A_m Med	Média de Eh_{max}	0,167	0,361	0,556	0,165
	Desvio Padrão	0,123	0,351	0,658	0,109

Figura 5.1– Histogramas de Eh_{max} das estações escolhidas para comparar A_m Med e A_m Cal.

Analisando a Figura 5.2 em conjunto com a Tabela 5.2, nota-se que são melhores os resultados obtidos para Em com A_m Cal em 3 dos 4 métodos analisados. Apenas **VxA Log** apresentou uma leve vantagem sobre os demais na solução A_m Med.

Tabela 5.2 - Valores médios de Em das 14 estações, para comparar $A_m Med$ e $A_m Cal$.

		Stevens	Man Log	VxA	VxA Log
$A_m Cal$	Média de Em	0,079	0,083	0,119	0,093
	Desvio Padrão	0,054	0,089	0,127	0,058
$A_m Med$	Média de Em	0,082	0,171	0,246	0,089
	Desvio Padrão	0,055	0,169	0,281	0,049

Figura 5.2 - Histogramas de Em das estações escolhidas para comparar $A_m Med$ e $A_m Cal$.

Optou-se pela utilização de $A_m Cal$ nas 100 estações analisadas ao invés de $A_m Med$, com base nos resultados e análises apresentadas anteriormente, e na seguinte consideração: a solução $A_m Cal$ permite um número significativamente maior de pontos (medições) na faixa

base que $A_m Med$, devido a esse fato a solução $A_m Cal$ possui invariavelmente uma faixa base de cotas mais ampla que $A_m Med$.

Os gráficos das curvas-chave das 14 estações analisadas na comparação das duas soluções propostas ($A_m Med$ e $A_m Cal$) e os resultados de Eh_{max} e Em , por solução em cada estação, podem ser conferidos no Anexo B.

5.2 – Aplicabilidade dos métodos de extrapolação propostos

Percebe-se na Tabela 5.3, onde se tem o levantamento da aplicação dos métodos de extrapolação por tipo de seção padrão, que os métodos com **VxA Log** seguido de **Manning Log** apresentam os maiores números de falhas de aplicação. Uma justificativa para isso pode ser dada por tratar-se de métodos propostos como alternativas aos métodos tradicionais a partir da observação dos gráficos de apoio das 100 estações, sem necessariamente uma correspondência ou explicação física para o fato. O método **VxA Log** não foi aplicado em 30 estações, devido ao baixo valor da correlação entre o ajuste logarítmico e os pontos dos gráficos de apoio. O mesmo aconteceu para o método **Manning Log** em 15 estações, sendo que em outras 14 estações a falhas na aplicação do método deveu-se a distorção causada pela variável R_h no cálculo da vazão (ver item 4.6). Esse mesmo motivo ocasionou as 15 falhas nos métodos de **Stevens** e **Manning Fix**.

Os métodos com maior frequência de aplicação foram **VxA e Logarítmico**. No caso do método **Logarítmico**, a única regra para a aplicação do método, é o ajuste da equação do tipo condição necessária é o ajuste da equação do tipo $Q = a (H - H_o)^n$ aos pontos da faixa base, condição simples de ser atendida. Já o método **VxA** surpreende pela aplicabilidade, uma vez que depende de um bom ajuste linear do gráfico HxV .

Tabela 5.3 – Número de estações onde não se aplicou os métodos de extrapolação (*falhas*).

Seção Padrão e nº de estações	Nº de falhas por métodos					
	Stevens	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
SC - 22	6	6	10	1	2	0
SE - 14	6	6	7	1	0	0
SG - 36	2	2	9	2	13	0
SS - 28	1	1	3	0	15	0
Total - 100	15	15	29	4	30	0

A Tabela 5.4 mostra os valores médios, por seção padrão, do coeficiente de correlação (R^2) entre os pontos e a equação da linha de tendência gerada nos gráficos de apoio na aplicação dos métodos: **Stevens**, **Manning Log**, **VxA** e **VxA Log**.

Tabela 5.4 – Valores médios de R^2 dos gráficos de apoio por método.

	Stevens gráfico ($A_m R_h^{1/2} \times Q$)	Manning Log gráfico ($H \times K_m$)	VxA gráfico ($H \times V$)	VxA Log gráfico ($H \times V$)
seções SC	0,917	0,592	0,665	0,645
seções SE	0,918	0,737	0,783	0,743
seções SG	0,924	0,683	0,711	0,556
seções SS	0,947	0,860	0,905	0,860
Média	0,929	0,736	0,767	0,673

Finalmente vale lembrar que das 100 estações em questão, em 43 estações pôde-se aplicar todos os 6 métodos propostos, em 37 estações foi possível aplicar 5 métodos e em 5 estações aplicou-se 4 métodos.

5.3 – Estimativa da vazão na cota máxima

Os valores médios e desvios padrões de Eh_{max} das estações analisadas por situação de *Superestimativa* ($Eh_{max} > 0$) e *Subestimativa* ($Eh_{max} < 0$) da vazão pseudo-extrapolada na cota máxima (Qe_m), além das médias e desvios padrões de Em , são apresentados na Tabela 5.5. Os valores de Eh_{max} dessa tabela, sem desvios padrões, estão representados no histograma da Figura 5.3, juntamente com o valor da diferença absoluta entre as médias de sub e superestimativa por método (amplitude).

Tabela 5.5 – Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e médias de Em por método.

Diferença	Médias	Métodos de Extrapolação Analisados					
		Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
Eh_{max}	Subestima	-0,1731	-0,2595	-0,1475	-0,1805	-0,2493	-0,1909
	Desvio	0,1482	0,1638	0,1463	0,1689	0,1831	0,1835
	Superestima	0,1787	0,1871	0,2247	0,3541	0,2072	0,2668
	Desvio	0,1504	0,1686	0,2439	0,3128	0,2125	0,3567
Em	Média	0,0751	0,0990	0,0793	0,1186	0,0929	0,0929
	Desvio	0,0574	0,0650	0,0775	0,1089	0,0695	0,1172

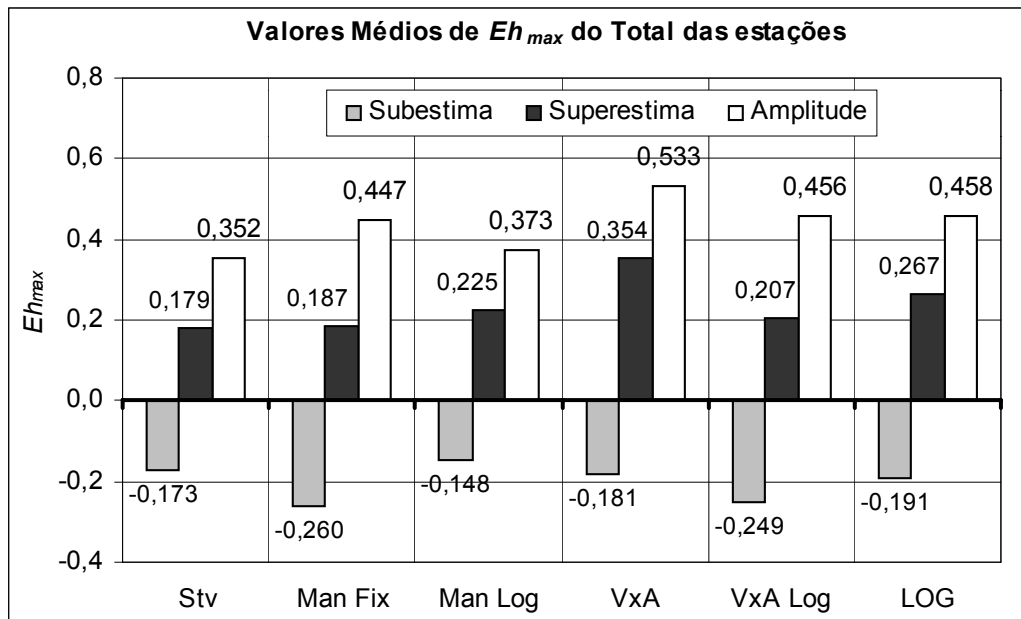


Figura 5.3 – Histogramas dos valores médios de Eh_{max} do total das estações por método. (Stv – Stevens; Man Fix – Manning com K_m fixo; Man Log – Manning Logarítmico; VxA – Velocidade x Área; VxA Log – Velocidade x Área Logarítmico; LOG – Logarítmico).

Analisando a Tabela 5.5 e o histograma da Figura 5.3 nota-se que o método de **Stevens** apresenta a menor amplitude e maior equilíbrio entre os valores médios de Eh_{max} para *sub* e *superestimativa*. Em seguida encontra-se **Manning Log** sendo que o método **VxA** apresenta a maior disparidade entre os dois valores.

No Anexo C são apresentados os resultados detalhados da Tabela 5.5 e da Figura 5.3.

Outra análise da *sub* e *superestimativa* da vazão Q_{c_m} , encontra-se na Tabela 5.6, que mostra o percentual do total de estações por método, onde houve *sub* ou *superestimativa*. Lembrando que o número total de estações aplicadas por método, varia, conforme a última linha da mesma tabela.

Tabela 5.6 - Estimativa de Q_{c_m} por método de extrapolação do total das estações.

% Estações com Q_{c_m}	Métodos de Extrapolação Analisados					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
Subestimado	62,3%	64,7%	46,5%	28,1%	65,7%	40,0%
Superestimado	37,6%	35,3%	53,5%	71,9%	34,3%	58,0%
Igualado ao da curva	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%
nº estações consideradas	85	85	71	96	70	100

Destacam-se na Tabela 5.6 os métodos de **Stevens**, **Manning Fix** e **VxA Log** que tendem a *subestimar* Q_{c_m} no total das estações, numa proporção semelhante e de

5.4 – Categorização de Eh_{max} e Em na forma percentual.

Os valores de Eh_{max} e Em foram categorizados em classes percentuais como mostra a Tabela 5.8. A partir dessa categorização calculou-se o percentual de estações inseridas nas classes propostas, por método de extrapolação. As Tabelas 5.9 a 5.16, a seguir, condensam as tabelas do Anexo C mostrando o percentual de estações que se enquadram em cada classe, do total de estações analisadas e por seção padrão, além dos valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em .

Optou-se também por representar os valores de Eh_{max} e Em na forma de histogramas apresentados nas Figuras 5.4 a 5.8, agrupados por tipo de seção padrão e no total das estações, facilitando a visualização dos resultados e auxiliando nas análises.

Tabela 5.8 – Categorias adotadas para as diferenças Eh_{max} e Em .

Faixa de diferenças % de Eh_{max} e Em	Classes
Entre 0% e 5% (inclusive)	A
Entre 5% e 10% (inclusive)	B
Entre 10% e 15% (inclusive)	C
Entre 15% e 20% (inclusive)	D
Maior que 20%	E
Não aplicação do método (falha)	-

5.4.1 – Análise do total das estações

Analisando Eh_{max} na Tabela 5.9 nota-se que a classe com os maiores percentuais, dentre todos os métodos, é a classe E. Destacam-se nessa análise os métodos **Manning Fix** e **VxA** que apresentam o maior número de estações na classe E, 43% e 55% respectivamente. O baixo desempenho do método de **Manning Fix** para Eh_{max} pode ser explicado pela provável estabilização desse parâmetro em cotas mais altas que aquelas onde se iniciou a pseudo-extrapolação. Chama a atenção o desempenho de **VxA** nessa análise, levemente abaixo de **VxA Log**, que foi uma alternativa proposta para o método.

Tabela 5.9 – Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em do total (100 estações).

Classes	Eh_{max}						Em					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
A	15%	13%	13%	15%	7%	26%	35%	23%	32%	31%	23%	48%
B	17%	8%	15%	13%	14%	18%	26%	23%	21%	24%	23%	22%
C	17%	13%	11%	6%	9%	11%	17%	19%	9%	15%	14%	14%
D	11%	5%	11%	7%	12%	8%	5%	14%	5%	12%	3%	5%
E	26%	43%	21%	55%	28%	37%	2%	6%	4%	14%	7%	11%
-	15%	15%	29%	4%	30%	0%	15%	16%	29%	4%	30%	0%

Ainda na Tabela 5.9 percebe-se uma sensível melhora nos percentuais de Eh_{max} para Em , por metodologia, onde todos os métodos têm, na classe A e B, o maior número de estações. Este fato pode ser explicado considerando que as incertezas nas medições são maiores nos extremos da curva-chave. Vale lembrar que a média da faixa de cotas medidas nas 100 estações é de 512 cm, sendo a média de amplitude da faixa de pseudo-extrapolação de 255 cm.

Os histogramas da Figura 5.4 que também mostram os resultados do total das estações analisadas reforçam a análise da Tabela 5.9, individualizando os resultados numa forma gráfica. Uma análise desses histogramas confirma o bom desempenho de **Stevens** em comparação aos outros métodos. O método **Manning Fix** também apresenta um desempenho razoável apesar de possuir 43% das estações com Eh_{max} na classe E.

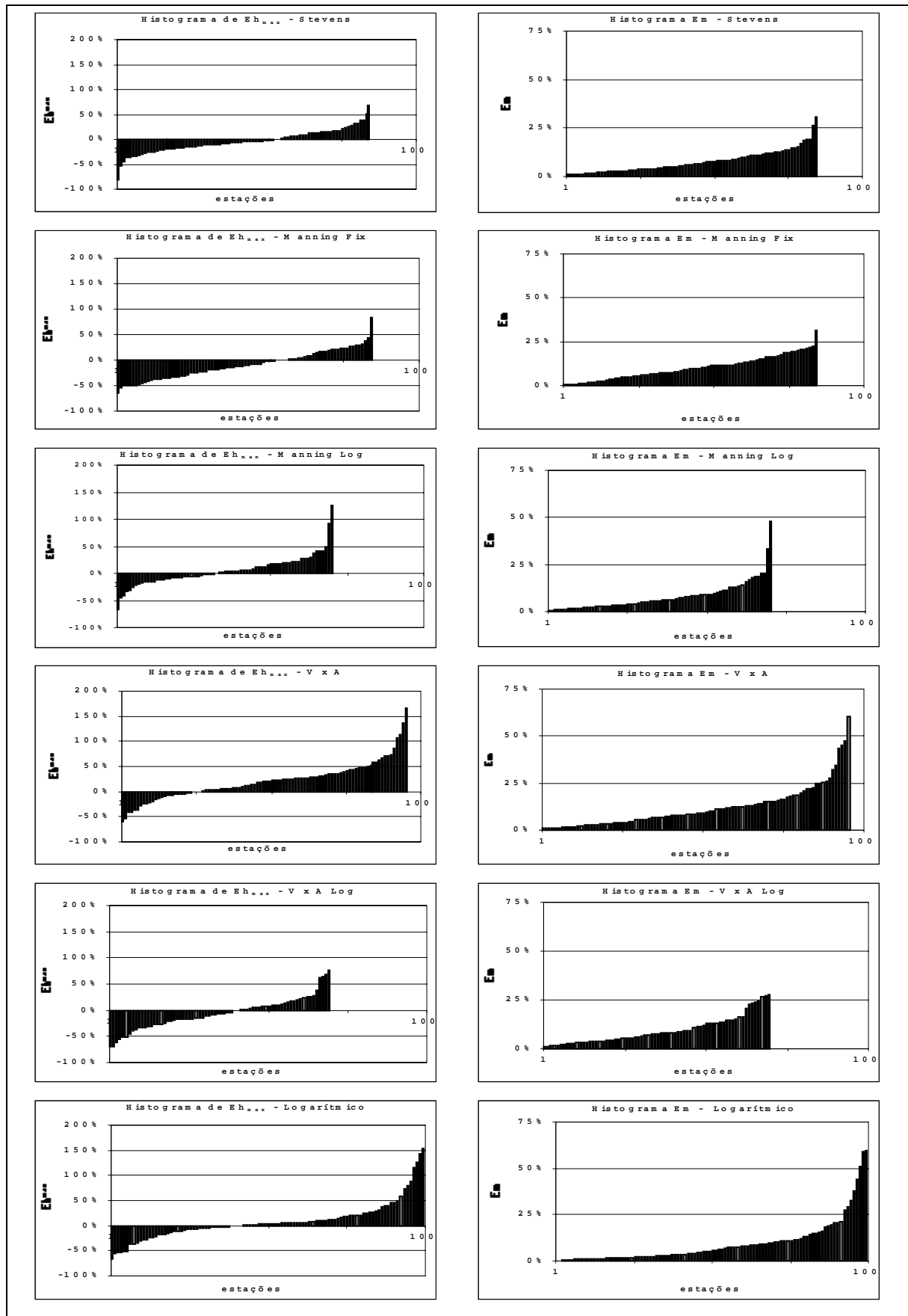


Figura 5.4 – Histogramas percentuais de Eh_{max} e Em , para todas as estações por método.

5.4.2 – Seções padrão do tipo SG

Analisando Eh_{max} , na Tabela 5.10, das estações com seção padrão SG, destaca-se o número de estações na classe A pelo método de **Manning Fix** (22%). Em contraposição, o mesmo método também apresenta um alto percentual de estações na classe E (39%).

O desempenho do método **VxA**, para Eh_{max} , também se destaca pela quantidade de estações na classe E (61%). O método **Logarítmico** foi o que apresentou o maior percentual de estações nas classes A e B (28%), equilibrando-se ao percentual de estações na classe E (31%). Foi também este o método que apresentou o melhor ganho de Eh_{max} para Em , onde as classes A e B somam 83% (30 estações).

Tabela 5.10 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SG (36 estações).

Classes	Eh_{max}						Em					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
A	17%	22%	14%	17%	8%	28%	39%	36%	31%	28%	22%	58%
B	14%	14%	6%	8%	14%	28%	25%	25%	17%	22%	31%	25%
C	22%	6%	17	6%	17%	11%	28%	19%	14%	14%	8%	8%
D	14%	14%	11%	3%	8%	3%	3%	8%	8%	14%	0%	0%
E	28%	39%	28%	61%	17%	31%	0%	6%	6%	17%	3%	8%
-	6%	6%	25%	6%	36%	0%	6%	6%	25%	6%	36%	0%

Analisando os histogramas da Figura 5.5 em conjunto com a Tabela 5.11 para as seções padrão SG, nota-se que os métodos de **Stevens** e **Manning Fix** apresentaram bons resultados de Eh_{max} e Em comparados com os demais métodos, com um bom equilíbrio entre *sub* e *superestimativa* de Qc_m , e sem picos entre os valores. O método **Logarítmico** também apresenta valores tão baixos quanto **Stevens** e **Manning Fix** porém, 3 estações, a saber: 714900000, 84100000 e 86470000 apresentam valores altos de Eh_{max} e Em , que eleva as médias de *superestimativa* de Eh_{max} e do desvio padrão de Em . Excluindo essas 3 estações da classificação SG, o método **Logarítmico** apresentaria o melhor desempenho entre os métodos para esse tipo de seção padrão. O método **VxA Log** também apresenta valores razoáveis porém com o agravante da baixa aplicabilidade: 23 estações de um total de 36.

Tabela 5.11 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SG.

Diferença	Médias	Métodos					
		Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
Eh_{max}	Subestima	-0,140	-0,216	-0,152	-0,102	-0,141	-0,103
	Desvio	0,104	0,160	0,102	0,092	0,102	0,089
	Superestima	0,166	0,142	0,280	0,365	0,179	0,217
	Desvio	0,094	0,109	0,301	0,337	0,179	0,421
Em	Média	0,075	0,082	0,099	0,123	0,070	0,085
	Desvio	0,046	0,060	0,096	0,121	0,054	0,136

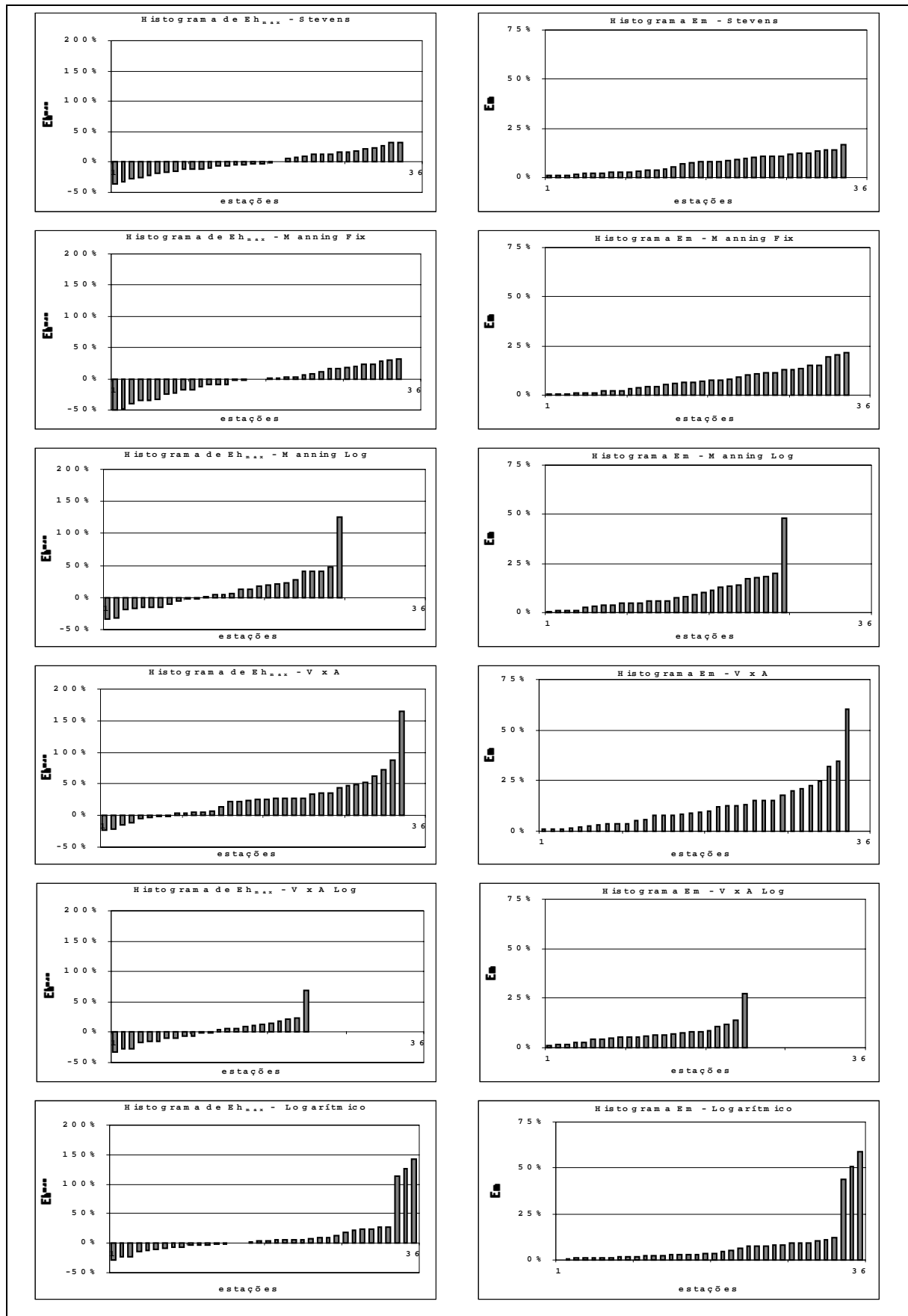


Figura 5.5 – Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SG.

5.4.3 – Seções padrão do tipo SC

A Tabela 5.12, das estações com seção padrão SC, mostra um número significativo de estações na classe E de Eh_{max} , para todos os métodos de extrapolação com destaque para, **VxA** e **Logarítmico** com os maiores valores. O método que se sobressai nesse quadro é **VxA Log** com 41% das estações nas classes A e B e um baixo percentual de falhas. Em termos de Em não há nenhum destaque por método. Resultados menos favoráveis, para esse tipo de seção padrão, não surpreendem considerando serem os perfis menos regulares sob o aspecto do fator geométrico.

Tabela 5.12 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SC (22 estações).

Classes	Eh_{max}						Em					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
A	5%	14%	9%	14%	14%	27%	14%	18%	23%	27%	36%	36%
B	9%	5%	9%	9%	27%	5%	32%	14%	14%	23%	18%	14%
C	18%	5%	14%	5%	5%	9%	14%	27%	5%	9%	18%	14%
D	9%	9%	5%	9%	9%	9%	9%	5%	9%	5%	9%	14%
E	32%	36%	18%	59%	36%	50%	5%	9%	5%	32%	9%	23%
-	27%	32%	45%	5%	9%	0%	27%	27%	45%	5%	9%	0%

Analisando os histogramas da Figura 5.8 em conjunto com Tabela 5.13 para as seções padrão SC, pode-se notar que tanto para Eh_{max} como para Em , os métodos de **Stevens** e **VxA Log** apresentam os melhores resultados comparados aos demais. O pior método dentre essas estações foi **VxA**.

Tabela 5.13 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SC.

Diferença	Médias	Métodos					
		Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
Eh_{max}	Subestima	-0,188	-0,216	-0,139	-0,089	-0,209	-0,224
	Desvio	0,104	0,177	0,180	0,091	0,124	0,206
	Superestima	0,284	0,301	0,295	0,529	0,254	0,351
	Desvio	0,217	0,239	0,297	0,378	0,253	0,412
Em	Média	0,088	0,106	0,090	0,157	0,095	0,133
	Desvio	0,070	0,077	0,094	0,146	0,084	0,144

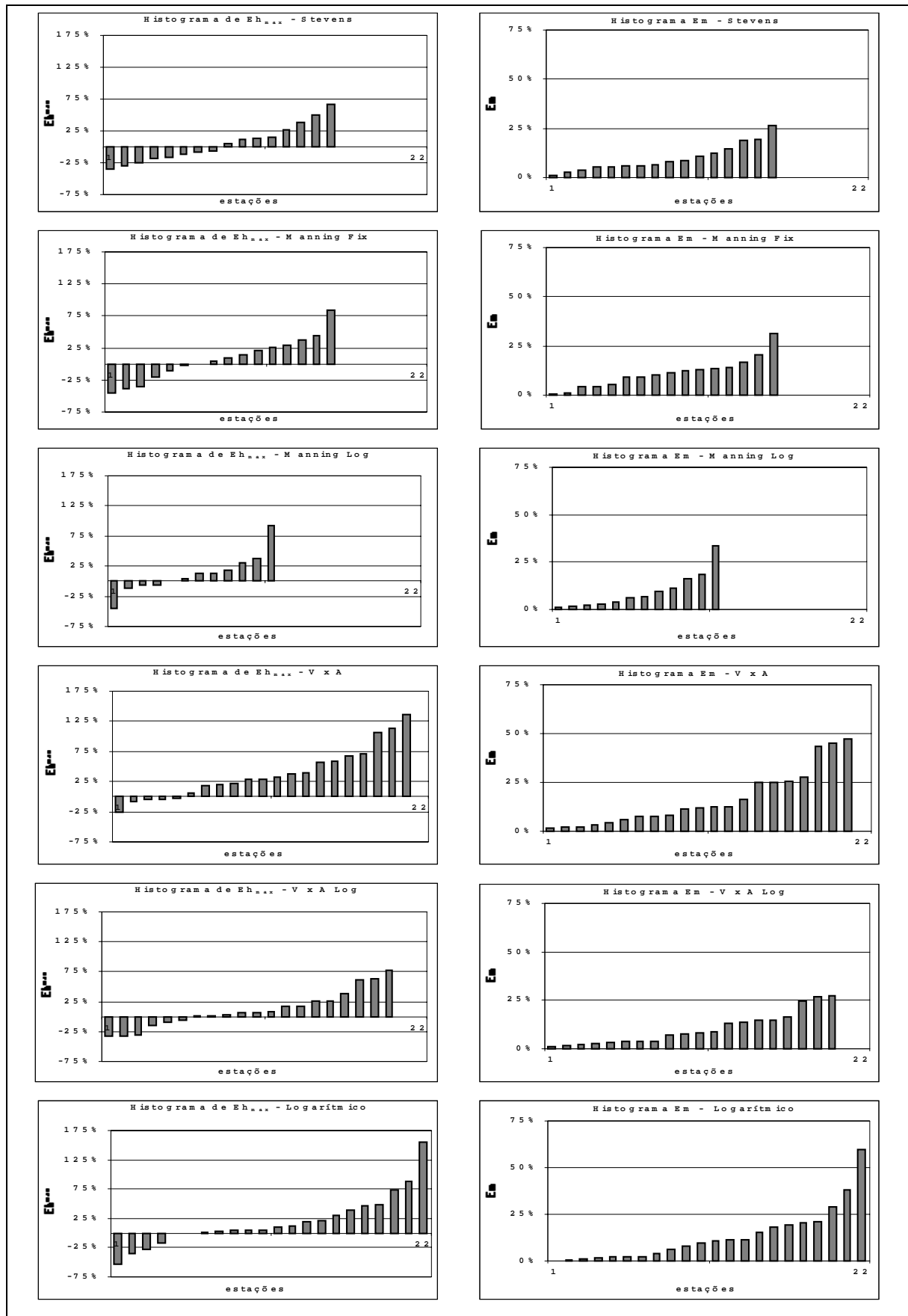


Figura 5.6 – Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SC.

5.4.4 – Seções padrão do tipo SS

As estações com seção padrão tipo SS, representadas na Tabela 5.14, são as mais simples em termos de perfil transversal, havendo uma expectativa de melhores resultados, se comparados aos outros padrões de seção. De fato, comparando os percentuais das estações nas cinco classes para Eh_{max} , os resultados são os melhores dentre aos quatro tipos de seções padrão. Analisando a mesma tabela os métodos de **Stevens** e **Manning Log** apresentam os melhores resultados tanto para Eh_{max} como para Em e os métodos **Manning Fix** e **VxA Log** os piores resultados.

Tabela 5.14 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SS (28 estações).

Classes	Eh_{max}						Em					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
A	21%	4%	18%	14%	4%	36%	54%	18%	43%	46%	14%	50%
B	29%	7%	32%	25%	7%	14%	32%	29%	39%	25%	18%	29%
C	18%	14%	7%	11%	4%	7%	7%	18%	7%	14%	7%	7%
D	14%	18%	18%	14%	14%	14%	4%	25%	0%	11%	4%	7%
E	14%	54%	14%	36%	18%	25%	0%	7%	0%	4%	4%	7%
-	4%	4%	11%	0%	54%	0%	4%	4%	11%	0%	54%	0%

A análise dos histogramas da Figura 5.7 e da Tabela 5.15 para as seções padrão SS, mostra que o método de **Stevens** e **Manning Log**, apresentaram os valores mais baixos para Eh_{max} , e Em .

Tabela 5.15 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SS.

Diferença	Médias	Métodos					
		Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
Eh_{max}	Subestima	-0,145	-0,264	-0,103	-0,162	-0,232	-0,088
	Desvio	0,099	0,144	0,073	0,173	0,183	0,076
	Superestima	0,071	0,152	0,123	0,196	0,104(*)	0,202
	Desvio	0,053	0,089	0,081	0,136	-	0,217
Em	Média	0,061	0,117	0,060	0,077	0,095	0,072
	Desvio	0,037	0,060	0,033	0,057	0,064	0,082

(*) – situações onde se enquadrou uma única estação, impossibilitando o cálculo do Desvio Padrão.

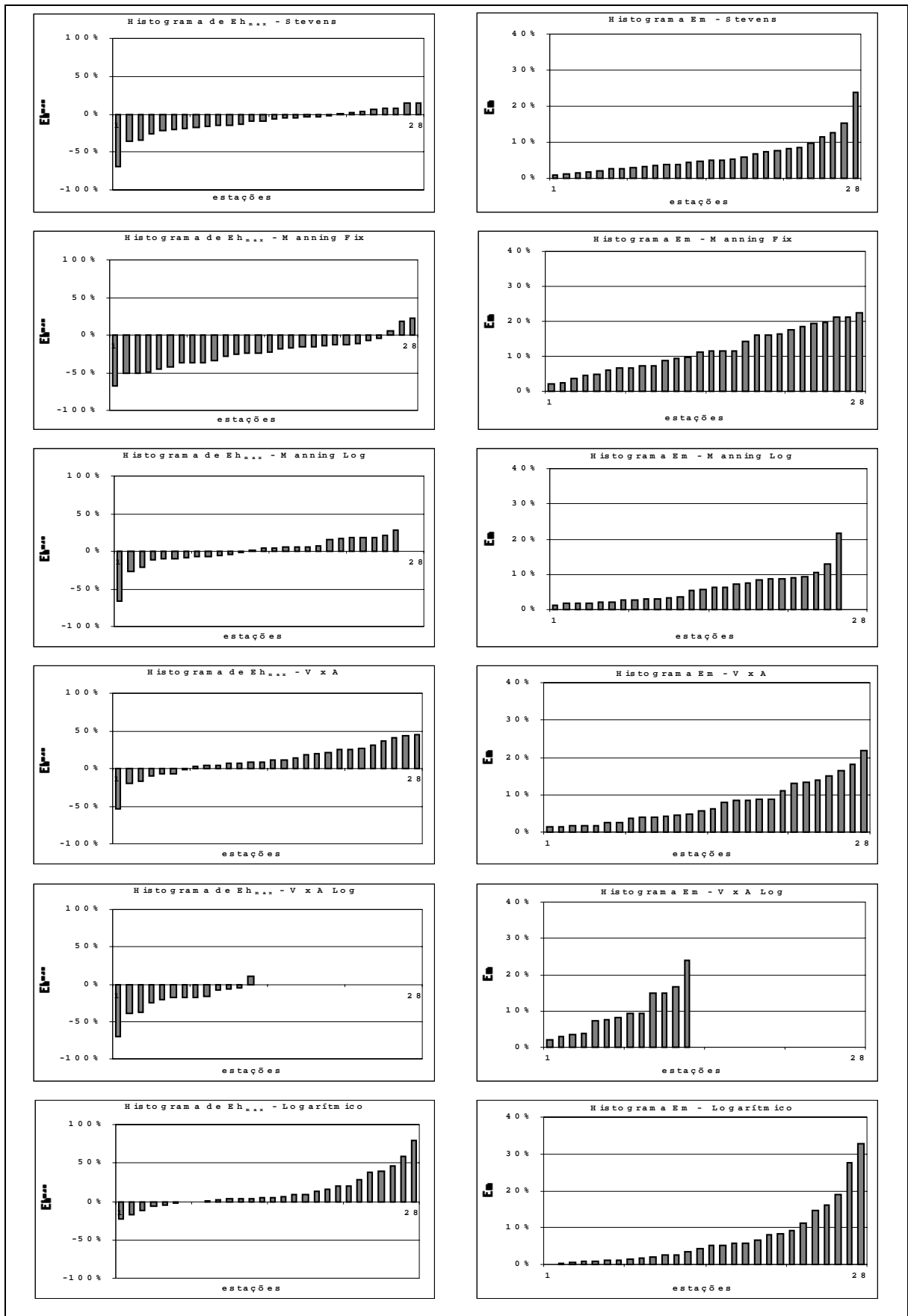


Figura 5.7 – Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SS.

5.4.5 – Seções padrão do tipo SE

Analisando Eh_{max} , na Tabela 5.16, nota-se que nenhum dos métodos estudados, mostra-se satisfatório para esse tipo de seção padrão. No caso de Em o método **Logarítmico** é o que se apresenta superior aos demais.

Tabela 5.16 - Percentual de estações por classe de Eh_{max} e Em , padrão SE (14 estações).

Classes	Eh_{max}						Em					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
A	7%	7%	7%	14%	0%	0%	21%	7%	29%	14%	21%	36%
B	14%	0%	14%	7%	7%	14%	7%	21%	7%	29%	21%	14%
C	0%	0%	0%	0%	7%	21%	14%	7%	7%	29%	36%	43%
D	0%	7%	7%	0%	21%	7%	7%	21%	0%	21%	0%	0%
E	36%	43%	21%	71%	64%	57%	7%	0%	7%	0%	21%	7%
-	43%	43%	50%	7%	0%	0%	43%	43%	50%	7%	0%	0%

Os histogramas da Figura 5.8 e a Tabela 5.17 para as seções padrão SE, confirmam o baixo desempenho dos métodos em Eh_{max} . É interessante perceber que todos os métodos no geral tendem a *subestimar* fortemente a vazão calculada na cota máxima nessas estações. Esse fato, e o baixíssimo desempenho dos métodos estudados nas seções padrão SE não surpreende, devido ao extravasamento da calha menor do leito, como será melhor explicado adiante.

Tabela 5.17 - Valores médios e desvios padrões de Eh_{max} e Em para as seções padrão SE.

Diferença	Médias	Métodos					
		Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
Eh_{max}	Subestima	-0,321	-0,417	-0,228	-0,354	-0,409	-0,334
	Desvio	0,290	0,177	0,259	0,166	0,187	0,209
	Superestima	0,390(*)	0,111	0,276(*)	0,397	0,125	0,112(*)
	Desvio	-	0,150	-	0,232	0,137	-
Em	Média	0,116	0,113	0,078	0,119	0,114	0,091
	Desvio	0,097	0,061	0,070	0,057	0,070	0,059

(*) – situações onde se enquadrava uma única estação, impossibilitando o cálculo do Desvio Padrão.

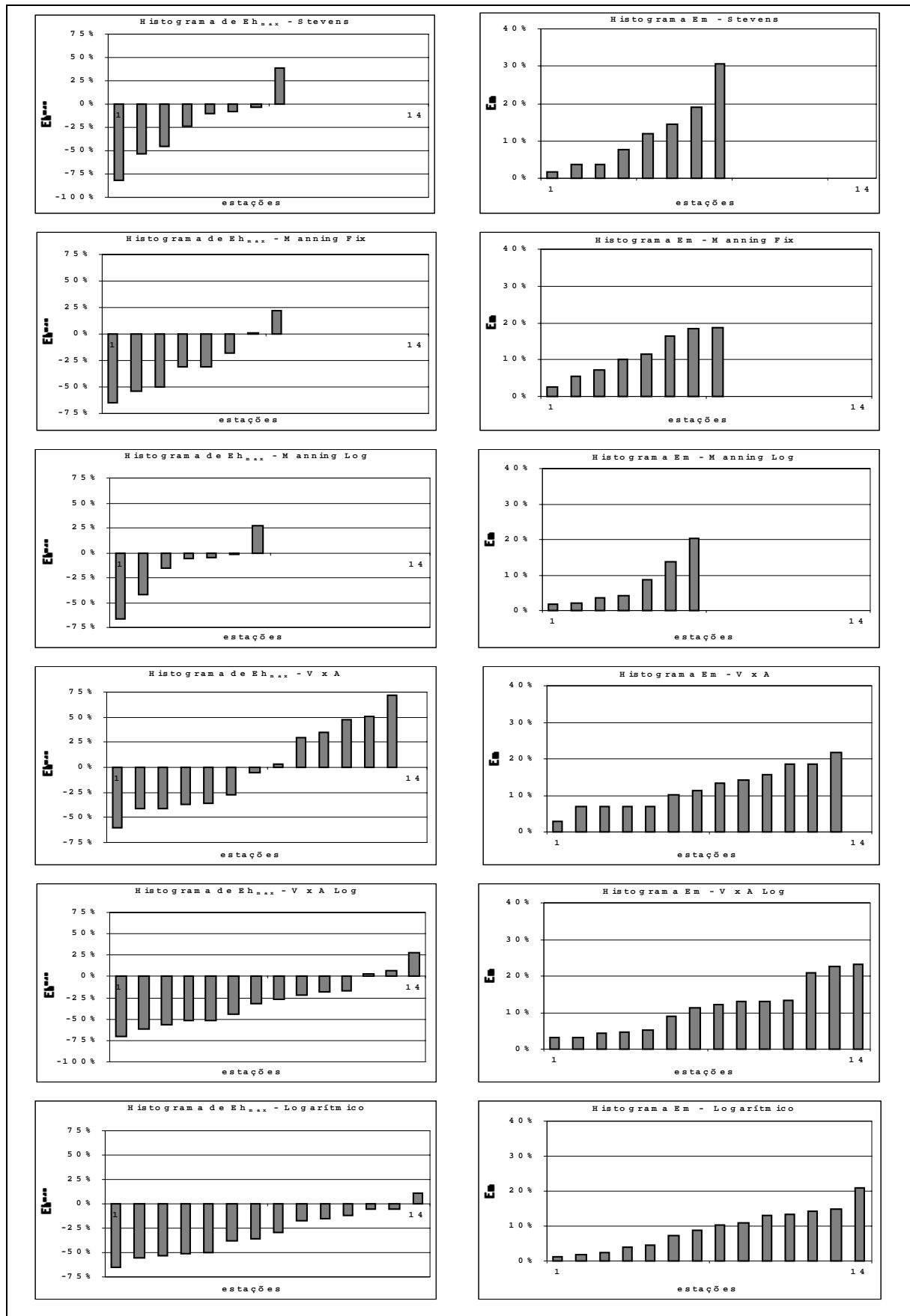


Figura 5.8– Histogramas de Eh_{max} e Em , em percentual, para as seções tipo SE.

5.5 – Análise dos resultados por Método de Extrapolação

A seguir fez-se uma análise, por método de extrapolação para o total das estações analisadas, com base nos resultados e discussões apresentados anteriormente, e finalmente uma análise da correlação entre o R^2 dos gráficos de apoio e o valor de Eh_{max} .

5.5.1 – Método de Stevens

Fazendo uma análise global dos valores de Eh_{max} e Em no total das estações estudadas, pode-se afirmar que o método de **Stevens** apresentou uma pequena vantagem sobre os demais. A base dessa afirmativa se apóia nos seguintes fatores:

- 85% cento de aplicação nas estações estudadas (Tabela 5.3) com a maior média de R^2 para o gráfico de apoio (Tabela 5.4);
- menor amplitude entre as médias de Eh_{max} (Figura 5.3), e menor valor médio e desvio padrão de Em (Tabela 5.5);

O método de **Stevens** *subestima* Qc_m em 62,3% das estações analisadas com um valor médio de Eh_{max} de 18,6% e *superestima* a mesma variável em 37,6% das estações das estações analisadas, com Eh_{max} médio de 17,3% (Tabela 5.5 e Tabela 5.6).

Uma análise do método por seções padrão mostra que **Stevens** figura sempre entre as melhores opções, exceto para as seções com padrão SE.

5.5.2 – Métodos: Manning Fix e Manning Log

No total das estações estudadas o método alternativo proposto **Manning Fix**, mostrou um baixo desempenho comparado aos demais métodos propostos e analisados. Analisando os mesmos fatores considerados em Stevens:

- a aplicabilidade de 85% nas estações estudadas (Tabela 5.3) a exemplo de Stevens;
- a amplitude entre os valores médios de Eh_{max} (Figura 5.3), é a terceira menor, já o valor médio de Em apresenta um resultado razoável: 9,9% (Tabela 5.5).

O método **Manning Fix** *subestima* Qc_m em 64,7% do total das estações com média de Eh_{max} de 25,9% e *superestima* em 35,3% das estações com Eh_{max} de 18,7% (Tabela 5.5 e Tabela 5.6). Analisando o desempenho do método por seção padrão, mostra-se razoável nas seções padrão tipo SG e SC (Figuras 5.5 e 5.6), com desempenho baixo nas seções padrão SS e SE (Figuras 5.7 e 5.8).

O método **Manning Log**, a não ser pela aplicabilidade em 71 contra 85 do método **Manning Fix**, mostrou resultados levemente superiores a este. Tal fato era esperado uma vez que Manning Log considera a variação do fator de rugosidade com o aumento da cota,

situação mais de acordo com a realidade, mesmo que se questione a função logarítmica utilizada.

Em termos de estimativa de Q_{c_m} o método **Manning Log** *subestimou* em 46,5% das 71 estações onde se aplicou o método, com Eh_{max} médio de 14,8% e *superestimou-se* em 53,5% dessas estações com Eh_{max} médio de 22,5% (Tabela 5.5 e Tabela 5.6).

Na análise de **Manning Log** por tipo de seção padrão, destaca-se com um bom desempenho para as seções SS (Figura 5.7) e como método ligeiramente superior aos demais para as seções SE (Figura 5.8). Para as demais seções padrão seu desempenho foi mediano.

5.5.3 – Métodos: VxA e VxA Log

O método **VxA**, na avaliação global, apresentou resultados abaixo dos demais métodos.

No aspecto da aplicabilidade, o método mostrou-se bom, aplicado em 96 das 100 estações (Tabela 5.4), considerando o fato que o mesmo depende de uma correlação razoável no gráfico de HxV , com uma média geral de R^2 de 0,767 (Tabela 5.4), porém a amplitude entre os valores médios de Eh_{max} é a mais alta de todas (Figura 5.3). Analisando a estimativa de Q_{c_m} , para o método, tem-se que o mesmo *subestima* 28,1% das estações com uma média de Eh_{max} igual a 18,1% e *superestima* Eh_{max} em 71,9% com valor médio de 35,4% (Tabela 5.5 e Tabela 5.6).

Comparando o desempenho dos métodos **VxA** e **VxA Log**, nota-se que este último mostrou resultados melhores que **VxA** em termos proporcionais ao número total de estações onde foi possível se aplicar cada método.

Analisando por seção padrão, **VxA Log** tem seu melhor desempenho nas seções padrão SG e SC (Figura 5.5). O método **VxA** por sua vez, não se destaca em nenhum dos casos por seção padrão.

5.5.4 – Método Logarítmico

Finalmente o método Logarítmico, no total das estações analisadas, apresenta resultados quanto ao número de estações por classe de Eh_{max} e Em tão bons quanto Stevens (Tabela 5.9). No entanto os valores médios dessas variáveis são elevados, sendo que para a *subestimativa* de Eh_{max} a média é de 19,1% em 40% das estações e a *superestimativa* da mesma variável igual a 26,7% em 58% das estações (Tabela 5.5 e Tabela 5.6).

Como pode-se verificar na Figura 5.4, o método Logarítmico apresenta valores de Eh_{max} e Em nos extremos elevando a média dos mesmos, denotando uma inconstância nos resultados. Apesar disso, os resultados apresentados pelo método foram além das expectativas, uma vez que o mesmo só pressupõe que a curva-chave se ajusta a uma equação do tipo $Q = a (H - H_0)^n$, não levando em conta fatores geométricos, de rugosidade ou declividade da linha d'água, como os demais métodos, mesmo que de forma implícita.

Analisando o método Logarítmico por seções padrão, nota-se um bom desempenho nas seções SG (Tabela 5.10) e SS (Tabela 5.14), tanto em Eh_{max} como em Em .

O Anexo D reúne os gráficos das curvas-chave das 100 estações analisadas, além dos gráficos de apoio dos métodos de extrapolação: Stevens, VxA, VxA Log e Manning Log. Além disso, dentro do gráfico da curva-chave, encontra-se o gráfico do perfil transversal da seção de medição escolhida para a aplicação dos métodos de extrapolação.

Capítulo VI - Conclusões e Recomendações

Esse trabalho teve como propósito comparar os resultados de extrapolação superior de curvas-chave, feita por seis métodos diferentes, sendo que quatro desses métodos foram aplicados como sugere a bibliografia: Stevens, Manning ou Manning Fix (ver item 4.5.3), Velocidade-Área e Logarítmico. Os outros dois são alternativas propostas para os métodos de Manning e Velocidade-Área, aqui denominados: Manning Log e VxA Log.

Uma observação feita no decorrer do processo de aplicação dos métodos e análise dos resultados reitera as palavras de Jaccon e Cudo (1989) que sugerem que a extrapolação da curva-chave deva ser feita pelo maior número de métodos cujas condições e dados disponíveis o permitam, buscando confrontar e criticar os resultados com base na teoria e experiência do hidrólogo sobre o assunto.

Conclusões, recomendações e sugestões são apresentadas a seguir.

6.1 – Conclusões

- A metodologia de *pseudo-extrapolação* apresentou-se como uma ferramenta alternativa válida no apoio ao estudo de métodos para a extrapolação superior de curvas-chave. Porém é importante frisar que as características da seção na faixa de extrapolação devem respeitar as condições necessárias à aplicação dos métodos principalmente no que tange a geometria da seção, controle da seção e rugosidade do leito;
- De uma forma geral os métodos de Stevens e Manning Log apresentaram um melhor equilíbrio entre os valores de *sub* e *superestimativa* da vazão na cota máxima. Além disso, os valores médios de Eh_{max} e Em gerados por esses métodos foram menores que os demais;
- O método Logarítmico mostrou uma razoável inconstância nos valores de Eh_{max} e Em . Apesar disso, os resultados apresentados pelo método foram além das expectativas, uma vez que o mesmo não leva em conta fatores geométricos, de rugosidade ou declividade da linha d'água, como outros métodos, mesmo que de forma implícita;
- Apesar do elevado número de estações onde não se pôde aplicar o método VxA Log, recomenda-se, quando possível, aplicar esse método nos estudos de extrapolação da

curva-chave, nos casos onde o gráfico HxV mostra um ajuste à função logarítmica, além do método VxA tradicional;

- Os métodos que dependem de gráficos de apoio, não são sensíveis ao coeficiente de correlação R^2 entre os pontos do gráfico e a linha de tendência ajustada aos mesmos, ou seja, uma forte dispersão no gráfico de apoio não significa necessariamente uma má extrapolação pelo método referente e vice-versa;
- Nenhum dos métodos propostos mostrou-se minimamente satisfatório para extrapolação superior da curva-chave nos casos onde há o extravasamento da calha menor do rio (seções padrão SE) quando evidenciada pela inflexão na curva-chave, fato já esperado. Notou-se nesses casos, que invariavelmente todos os métodos sem exceção *subestimaram* a vazão da curva-chave na cota máxima. Há seções padrão do tipo SE, no entanto onde esse extravasamento não se reflete na curva-chave, e nesses casos os métodos funcionam sensivelmente melhor;
- A forma como foi aplicado o método de Manning, fixando-se um valor de K_m para toda faixa de pseudo-extrapolação, aqui denominado de Manning Fix, foi insatisfatório, apontando para a estabilização do parâmetro em cotas mais altas que aquelas adotadas no limite superior da faixa base;
- As variações dos métodos propostos, a saber: Manning Log e VxA Log, apresentaram, de uma forma geral, bons resultados para as estações estudadas. e merecem uma investigação mais aprofundada.

6.2 – Recomendações e sugestões

A seguir algumas recomendações referentes às formas de aplicação dos métodos adotados nesse trabalho, e sugestões sobre formas de se abordar o tema em trabalhos futuros:

- Verificar outros tipos de função de ajuste para o gráfico HxV , do método VxA e para o gráfico HxK_m do método de Manning, tais como funções de potência e/ou polinomiais;

- Fazer um estudo em separado com um número maior de estações com seção transversal de padrão SE, contendo medições feitas no leito maior do rio, uma vez que nenhum dos métodos apresentados mostrou resultados razoáveis para esse tipo de seção;
- Ainda sobre as estações com seção transversal de padrão SE, um estudo valioso seria a aplicação do método VxA decompondo-se a seção como sugerem Jaccon e Cudo (1989). Para isso seria necessário dispor das planilhas de campo de medição de vazão, dados que estão sendo digitalizados pelos organismos responsáveis;
- Utilizar além das diferenças de vazão, para a análise dos métodos de extrapolação, diferenças de cota a exemplo do trabalho de Moreira et al (1991);
- Acrescentar ao critério de classificação das estações por seção padrão, além do fator geométrico um fator dimensional de largura e profundidade da seção e um parâmetro geral de confiabilidade na curva-chave traçada para a estação;
- Um estudo interessante seria a utilização da metodologia de *transferência de curva-chave*, nas vazões extremas, como apoio na escolha entre métodos de extrapolação;
- Os métodos Manning Log e VxA Log, merecem uma investigação mais aprofundada, em função dos resultados apresentados.

6.3 – Considerações finais

Todo estudo que envolve aplicação de modelos e que, por sua vez, exija do pesquisador uma familiarização tanto com o modelo quanto com os parâmetros envolvidos, requer uma sensibilidade inicial de fundamental importância para o encaminhamento do estudo. Quando se trabalha com um grande volume de informações pode-se adotar como prática um estudo piloto que consiste em aplicar a metodologia de trabalho escolhida a uma fração dos dados disponíveis, do início ao fim, analisando e buscando conclusões para os resultados encontrados. Dessa forma, se ganha familiaridade, não só com o modelo e seus parâmetros, mas permite encontrar brechas na metodologia escolhida, que só são percebidas quando afloram os primeiros resultados.

Finalmente, conclui-se o trabalho lembrando Fill (1987), que afirma não haver nenhum método de extrapolação que substitua efetivamente as medições de vazão, mesmo

quando em aparente contradição com a teoria, sendo a única maneira de se eliminar de forma definitiva as dúvidas sobre o traçado da curva-chave. Essa máxima, no entanto, não exclui a necessidade e a importância de se investigar métodos que permitam a previsão de vazões para extrapolação da curva-chave com menores incertezas, enquanto essas não podem ser, por qualquer motivo, efetivamente medidas.

Referências Bibliográficas

AZEVEDO, F. B. de et al. 1994; Análise de medições de vazão e definição de curva-chave. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, v. 2, p. 48-51.

BELTRAME, L. F. de S. ; SEFIONE, A. L. ; RISSO, A. 2000. **Consistência de dados hidrológicos da bacia do alto Uruguai**: relatório final. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 2v em 8.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2001. **Altas Hidrológico**. Brasília. Disponível em : <http://www.aneel.gov.br>

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. 1998. **Dados hidrológicos não consistidos**. Brasília. 1CD.

BRASIL. Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica 1981. **Inventário das Estações Fluviométricas**. Brasília. 134p.

BRASIL. Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica 1977; Fluviometria. In: —. **Manual para serviços de hidrometria**. São Paulo. cap.2, p. 14-40.

BRUSA, L. C.; CLARKE, R. T. 1999. Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave. Caso de estudo: bacia do rio Ibicuí. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.4, n.3, p.91-95. Jul/set .

CHEVALLIER, P. 1997. Aquisição e processamento de dados. In: Tucci, C. E. M. (Org.); **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre. Ed. da Universidade UFRGS. cap.13, p486-525.

CHOW V. T. 1994. **Hidraulica de canales abiertos**. Santafe de Bogota. McGraw Hill. 667p.

CHRISTOFOLETTI, A. 1981. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgar Blücher. v1.

FILIZOLA JR., N. P; GUIMARÃES, S. V.; GUYOT, J. L. 1999. Medição de Vazão em Grandes Rios. In: O estado das águas no Brasil - 1999 perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. Brasília: ANEEL. p. 197-211.

FILL, H. D. 1987. Informações Hidrológicas. In: MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos. Nobel: ABRH. cap.2,p. 93-210.

FRENCH, R. H. 1985. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw Hill. 705p.

GOMES, J. 1997. Investigação sobre métodos de extrapolação da curva de descarga. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 12., 1997, Vitória. **Anais...** São Paulo: ABRH. v.1. p. 509-515.

GOMES, J. et al. 2001. Investigação de métodos de extrapolação da curva de descarga: análise simultânea de um conjunto de estações fluviométricas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 14., 2001, Aracaju. **Anais...** Porto Alegre: ABRH. 1CD.

GRAFCHAV: guia do usuário. 1996. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 25 p.

JACCON, G.; CUDO, K. J. 1987. Calibragem de postos fluviométricos: roteiro cuidados e recomendações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. ABRH. 7., 1987, Salvador. **Anais ...** São Paulo: ABRH. v.2, p. 279-287.

JACCON, G.; CUDO, K. J. 1989 - **Curva-chave**: análise e traçado. Brasília: DNAEE. 273p.

LAPPONI, J. C. 1997. **Estatística usando o Excel 5 e 7**. São Paulo: Lapponi Treinamento e Editora Ltda. 401p.

MARQUES, P. E. 2001. **Hidrometria**. Porto Alegre: IPH. Comunicação Pessoal.

MOREIRA, F. M. et al. 1996. Análise de Consistência de Dados Fluviométricos. **A Água em Revista**. Belo Horizonte, v.4, n.7. p. 43 -47, maio.

MOREIRA, J. O. da SILVA; et al. 1991. Aspectos a serem considerados na extrapolação de uma curva-chave. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABRH. v.1. p. 60-68.

MULLER, M. et al. 1997. Transferência de curvas de descarga. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 12., 1997, Vitória. **Anais ...** São Paulo: ABRH. v.1, p. 503-507.

OLIVEIRA, J. H. de 1973. **Cálculo de descarga líquida pelo método da meia seção.** [S.l.] DNAEE. 10 p.

PEDROLLO, O. C.; PEDROLLO, M. C. R. e TUCCI, C. E. M 1991. Curva de descarga sujeita a remanso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS.9., 1991, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABRH. v.1, p. 69-76.

PINTO, N. S. P. et al 1976. **Hidrologia básica.** São Paulo: Edgard Blucher. 278p.

PORTO, R. M. 1998. **Hidráulica básica.** São Carlos: EESC/USP. 519p.

SANCHES ORDONEZ, J. E. 2000. **Fundamentos de Hidrologia.** 2.ed.ver.atual. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

SANTOS, I. dos; GOMES, J.; BUBA, H. 1997 – Medições de descarga líquida: método convencional x método acústico. Comparação de resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 12. 1997, Vitória. **Anais ...** São Paulo: ABRH. v.1, p.369-376.

SILVEIRA, R. L. da 1974. **Hidrometeorologia II:** notas de aula. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 2v.

TUCCI, C. E.; SILVEIRA, R. L. 1985. **Análise de consistência de dados fluviométricos.** Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Paginação irregular.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2001. Simulação hidrodinâmica das condições críticas. In: —. **Identificação das**

alternativas possíveis e prováveis para regularização das vazões do rio Gravataí:
relatório final. Porto Alegre.

VILLANUEVA, A. O. N. 1997. **Simulação de áreas de inundação dinâmicas:** canais compostos e wetlands. 164f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, dez. 1997.

A N E X O S

A N E X O A : D a d o s G e r a i s d a s E s t a ç õ e s F l u v i o m é t r i c a s U t i l i z a d a s

Tabela A.1 - Dados gerais das estações fluviométricas analisadas.

Estação Fluviométrica				Dados do período de validade definido para a curva-chave utilizada											
Código	Nome	Tipo de Seção Padrão	Área de Contribuição (Km ²)	Ano Início	Ano Final	N° de Medições	N° de Medições Excluídas	% de Medições Excluídas	N° de Medições na Faixa extrapolada	% de Medições Faixa extrapolada	Cotas medidas (cm)		Dif. entre as cotas (cm)	Vazões medidas (m ³ /s)	
											min	max		min	max
65095000	RIO PRETO DO SUL	SG	2495	51	98	305	6	2,0	7	2,3	69	500	431	12	267
70200000	INVERNADA VELHA	SG	2841	64	98	170	0	0,0	4	2,4	31	336	305	5	714
70300000	FAZENDA MINEIRA	SG	1119	42	98	191	12	6,3	2	1,0	27	448	421	1	992
70700000	PASSO SOCORRO	SS	8400	40	98	326	8	2,5	16	4,9	94	554	460	6	1298
71250000	PTE. RIO JOÃO PAULO	SG	512	59	98	220	17	7,7	3	1,4	67	571	504	1,2	104
71300000	RIO BONITO	SG	1984	80	98	52	1	1,9	8	15,4	66	863	797	8	222
71350000	ENCRUZILHADA	SG	2980	51	98	298	0	0,0	4	1,3	87	1121	1034	3	873
71350001	ENCRUZILHADA II	SG	3360	84	98	41	1	2,4	7	17,1	99	671	572	17,3	330
71383000	PONTE ALTA DO SUL	SC	4631	80	98	49	0	0,0	8	16,3	61	622	561	9,98	577
71490000	PTE. MAROMBAS	SG	360	83	98	46	0	0,0	7	15,2	54	547	493	0,62	220
71498000	PASSO MAROMBAS	SG	3654	74	98	398	0	0,0	6	1,5	182	910	728	0,1	1967
71550000	PASSO CARU	SS	9868	50	98	225	4	1,8	10	4,4	113	375	262	7,56	2385
71800000	COLONIA SANTANA	SS	13114	64	98	102	1	1,0	12	11,8	92	370	278	34	905
72630000	PASSO STA.TEREZA	SS	2775	70	98	140	1	0,7	5	3,6	42	386	344	2,02	314
72680000	PASSO COLOMBELLI	SS	3626	78	98	59	2	3,4	5	8,5	52	590	538	3	875
72849000	JOAÇABA	SS	3682	85	98	32	0	0,0	7	21,9	71	279	208	9	338
73010000	MACELINO RAMOS	SS	41267	42	98	241	4	1,7	40	16,6	100	300	200	38	6348
73200000	ITÁ	SS	44350	75	97	59	3	5,1	8	13,6	110	620	510	81,9	4443
73330000	PASSO ALTO IRANI	SS	900	72	98	109	1	0,9	6	5,5	30	261	231	1,59	238
73550000	PASSO CAXAMBU	SS	52671	49	98	126	0	0,0	11	8,7	100	992	892	108	8730
73765000	PASSO DO QUILOMBO	SS	282	76	98	65	1	1,5	2	3,1	88	324	236	0,178	93
73770000	PORTO FAE NOVO	SS	5880	79	98	66	4	6,1	7	10,6	61	562	501	32	1397
73820000	PASSO PIO X CV1	SS	992	76	94	50	4	8,0	3	6,0	48	352	304	0,1	198
73850000	PASSO NOVO ERECHIM	SS	7535	59	88	145	0	0,0	19	13,1	39	335	296	1	697
73900000	SAUDADES	SS	418	75	98	69	3	4,3	5	7,2	42	250	208	0,38	88
73960000	BARRA DO CHAPECÓ AUX	SS	8267	78	98	56	1	1,8	4	7,1	110	402	292	15,7	1499
74100000	IRAÍ	SC	62199	78	98	73	5	6,8	2	2,7	105	905	800	5,83	18553
74205000	LINHA CESCEN	SC	454	59	98	130	1	0,8	2	1,5	21	447	426	0,54	201
74270000	PASSO RIO DA VÁRZEA	SG	5356	75	98	72	2	2,8	6	8,3	57	600	543	8,55	1356
74460000	PTE. DO RIO TURVO	SG	505	83	98	47	0	0,0	6	12,8	61	488	427	3,17	56
74600000	CASCATA BURICÁ	SG	2265	75	98	71	4	5,6	5	7,0	9	597	588	1,6	400
74880000	PASSO SÃO JOÃO	SG	816	59	98	173	1	0,6	16	9,2	15	352	337	1,55	148
74900000	LINHA UNIÃO	SC	1248	69	98	141	0	0,0	6	4,3	23	617	594	1,23	375
75155000	PASSO FAXINAL	SG	2003	70	98	101	5	5,0	16	15,8	53	350	297	3	226
75185000	PTE. NOVA DO POTIRIBU	SG	628	73	98	154	5	0,6	3	1,9	59	310	251	3	154
75200000	CONCEIÇÃO	SC	805	42	98	270	0	0,0	2	0,7	53	450	397	2,01	154
75230000	SANTO ANGELO	SE	5414	41	98	240	0	0,0	8	3,3	9	639	630	5,64	1886
75295000	COLONIA MOUSQUER	SS	2131	74	98	92	1	1,1	3	3,3	48	479	431	4,43	442
75320000	PTE. MÍSTICA	SE	9420	79	98	60	1	1,7	5	8,3	102	828	726	41,1	2807
75400000	PASSO DO DIAS	SC	936	84	98	29	3	10,3	3	10,3	46	500	454	3,15	453
75450000	PASSO SANTA MARIA	SG	3277	80	98	49	0	0,0	4	8,2	115	889	774	12,1	576
75500000	PASSO DO SARMENTO	SE	5281	73	98	84	4	4,8	4	4,8	72	898	826	2,17	1021
75600000	PASSO DAS TURMAS	SG	388	84	98	38	0	0,0	2	5,3	27	451	424	0,12	177
75700000	PASSO DO NOVO	SE	3700	80	98	48	6	12,5	4	8,3	7	887	880	1,71	1555
76100000	VILA CLARA	SE	2783	42	98	279	0	0,0	21	7,5	52	1050	998	0,33	908
76310000	ROSARIO DO SUL	SC	12077	67	98	177	0	0,0	27	15,3	88	674	586	1,25	1943
76360001	AZEVEDO SODRE	SC	1220	76	98	47	0	0,0	7	14,9	2	496	494	1	141
76440000	JAGUARI	SG	2296	41	98	416	1	0,2	11	2,6	71	1015	944	1	1289
76460000	ERNESTO ALVES	SG	933	58	98	278	0	0,0	1	0,4	8	356	348	0,1	237
76490000	PASSO DO LORETO	SE	4578	55	98	224	3	1,3	22	9,8	80	1034	954	2	1321

Tabela A.2 - Dados gerais das estações fluviométricas analisadas.

Estação Fluviométrica				Dados do período de validade definido para a curva-chave utilizada											
Código	Nome	Tipo de Seção Padrão	Área de Contribuição (Km ²)	Ano Início	Ano Final	Nº de Medições	Nº de Medições Excluídas	% de Medições Excluídas	Nº de Medições na Faixa extrapolada	% de Medições Faixa extrapolada	Cotas medidas (cm)		Dif. entre as cotas (cm)	Vazões medidas (m ³ /s)	
											min	max		min	max
76500000	JACAQUA	SE	27771	42	98	166	9	5,4	37	22,3	112	660	548	10	1916
76550000	PONTE DO MIRACATU	SG	376	64	83	148	0	0,0	4	2,7	50	364	314	4	58
76560000	MANOEL VIANA	SC	29321	67	98	193	3	1,6	34	17,6	89	1054	965	18	4119
76600000	PASSO DO ITAUM	SG	31008	67	98	124	0	0,0	16	12,9	80	1029	949	26	3702
76650000	PASSO DA CACHOEIRA	SC	2562	47	98	192	7	3,6	12	6,3	0	562	562	15	366
76700000	PASSO DOS BRITOS	SG	3194	77	98	72	1	1,4	19	26,4	73	864	791	2	421
76750000	ALEGRETE	SG	5942	40	98	374	17	4,5	60	16,0	72	1215	1143	1,95	1166
76800000	PASSO MARIANO PINTO	SG	42498	67	98	152	6	3,9	12	7,9	38	833	795	51	4040
77150000	URUGUAIANA	SC	163547	82	98	57	7	12,3	11	19,3	92	1354	1262	429	31025
82350000	JARAGUA DO SUL	SS	796	39	98	250	0	0,0	4	1,6	56	267	211	3	342
82549000	SCHROEDER	SC	267	76	98	82	0	0,0	5	6,1	54	252	198	2	94
82770000	PONTE SC-3	SE	337	77	98	86	0	0,0	3	3,5	34	628	594	1	296
83050000	TAIO	SS	1575	34	95	317	0	0,0	57	18,0	17	296	279	1	105
83250000	ITUPORANGA	SG	1774	34	98	309	1	0,3	18	5,8	26	265	239	2	318
83300200	RIO DO SUL	SS	5100	79	98	74	0	0,0	8	10,8	82	896	814	20	1150
83440000	IBIRAMA	SC	3314	70	98	158	2	1,3	16	10,1	73	260	187	10,8	383
83500002	APIUNA	SS	9242	34	89	326	1	0,3	22	6,7	28	300	272	5	1103
83520000	WARNOW	SC	9714	81	98	63	1	1,6	5	7,9	48	740	692	18	2784
83680000	TIMBO	SS	1342	34	98	406	5	1,2	36	8,9	21	424	403	6	277
83690000	INDAIAL	SS	11151	34	95	252	3	1,2	11	4,4	81	552	471	21	2744
84100000	POCO FUNDO	SG	400	50	98	317	1	0,3	3	0,9	66	266	200	2	120
84949800	ERMO	SG	826	78	89	56	0	0,0	3	5,4	22	490	468	4	589
84950000	TAQUARUCU	SC	898	42	84	298	0	0,0	39	13,1	38	263	225	0,01	172
85438000	RESTINGA SECA	SE	914	77	98	69	2	2,9	21	30,4	62	619	557	0,26	93
85470000	PONTE SÃO GABRIEL	SE	973	67	98	180	0	0,0	15	8,3	94	652	558	0,11	269
85623000	SÃO SEPE-MONTANTE	SC	721	84	98	44	0	0,0	3	6,8	98	490	392	1,25	81
85642000	PASSO SÃO LOURENÇO	SG	27416	81	98	44	0	0,0	16	36,4	-43	776	819	35	1996
85670000	JUS FOZ ARROIO PIQUIRI	SC	1875	82	85	19	0	0,0	9	47,4	230	626	396	3,56	144
85830000	SANTA CRUZ	SC	784	78	98	69	1	1,4	9	13,0	23	612	589	0,23	128
85900000	RIO PARDO	SE	38753	40	98	153	0	0,0	24	15,7	0	1233	1233	8	5615
86160000	PASSO TAINHAS	SG	1107	40	98	294	0	0,0	7	2,4	39	526	487	0,35	561
86420000	PONTE DO PRATA	SC	319	63	98	161	3	1,9	6	3,7	65	194	129	0,67	115
86440000	PASSO DO PRATA	SC	3622	70	98	129	1	0,8	18	14,0	61	358	297	1	622
86470000	PTE DO RIO DAS ANTAS	SG	12298	82	76	76	1	1,3	6	7,9	87	640	553	26	1927
86480000	PASSO MIGLIAVACA	SS	1250	56	98	212	1	0,5	22	10,4	72	370	298	1	302
86500000	PASSO CARREIRO	SG	1829	40	98	549	6	1,1	66	12,0	38	405	367	0,35	442
86510000	MUCUM	SG	15826	40	98	302	1	0,3	24	7,9	42	718	676	6	2323
86560000	LINHA COLOMBO	SG	1980	40	98	302	0	0,0	6	2,0	18	351	333	1,85	471
86580000	SANTA LUCIA	SS	2382	40	98	302	0	0,0	8	2,6	6	364	358	1	506
86700000	PONTE JACARE	SC	432	44	98	267	0	0,0	10	3,7	38	310	272	0,5	212
86720000	ENCANTADO	SS	19200	86	98	45	0	0,0	4	8,9	75	619	544	15	2310
86745000	PASSO DO COIMBRA	SG	780	57	98	158	3	1,9	5	3,2	111	375	264	1	319
87160000	NOVA PALMIRA	SS	2017	42	85	159	8	5,0	11	6,9	43	348	305	1,25	405
87380000	CAMPO BOM	SE	2864	40	98	339	6	1,8	117	34,5	52	662	610	4,39	386
87382000	SÃO LEOPOLDO	SE	3131	73	98	113	2	1,8	51	45,1	56	507	451	6,22	458
87399000	PASSO DAS CANOAS-AUX	SS	1419	78	98	77	3	3,9	28	36,4	22	429	407	3,6	111
87401600	CERAMICA CHERUBINI	SG		91	98	29	0	0,0	5	17,2	99	371	272	0,36	11
87590000	PASSO DO CACAO	SG	4069	73	98	96	0	0,0	12	12,5	181	652	471	2	351
87905000	PASSO DO MENDONCA	SE	15543	68	98	176	0	0,0	23	13,1	78	638	560	23	2632
88850000	PTE CORDEIRO DE FARIAS	SC	362	64	98	243	0	0,0	6	2,5	30	700	670	1	173

Esclarecimento dos dados das Tabelas A.1 E A.2:

Código – nomenclatura utilizada pela ANEEL, que divide o país em 8 grandes bacias ou regiões hidrográficas, e cada uma delas divididas em 10 sub-bacias. Cada estação fluviométrica possui seu código identificador único de acordo com sua localização dentro da região hidrográfica (1º dígito), sub-bacia (2º dígito), rio (3º a 5º dígitos) e reserva para expansão da rede (6º a 8º dígitos) (Brasil, 1981);

Nome – nome pelo qual a estação fica conhecida (Brasil, 1981);

Tipo de Seção Padrão – siglas que remetem a um dos quatro padrões de geometria da seção transversal definidos nesse trabalho (ver item 4.4), padrões em que foram enquadradas as 100 estações analisadas;

Área de Contribuição. – é a área de contribuição da bacia até a seção transversal da estação em questão, expressa em Km²;

Ano Início/ Ano Final – são os anos inicial e final das medições do período de validade definido para a curva-chave utilizada;

Nº de Medições – é o número total de medições contidas no período de validade definido para a curva-chave utilizada na análise;

Nº de Medições Excluídas – número de medições excluídas por apresentarem má qualidade ou seja forte dispersão do conjunto geral dos dados, resultado provável de medições mal feitas;

% de Medições Excluídas – percentual de medições excluídas do número total de medições, contidas no período de validade definido para a curva-chave utilizada;

Nº de Medições na Faixa Extrapolada – número de medições contidas na faixa de pseudo-extrapolação após a exclusão das medições de má qualidade;

% de Méd Faixa extrapolada – percentual de medições contidas na faixa de pseudo-extrapolação após a exclusão das medições de péssima qualidade;

Cotas medidas min/max - valores das cotas mínima e máxima medidas dentro do período definido de validade da curva e após a exclusão das medições de má qualidade;

Dif. entre as cotas– diferença entre os valores das cotas mínima e máxima medidas citadas anteriormente.

Vazões medidas min/max – valores das vazões mínimas e máximas medidas dentro do período definido de validade da curva e após a exclusão das medições de má qualidade e não necessariamente associadas às cotas mínimas e máximas;

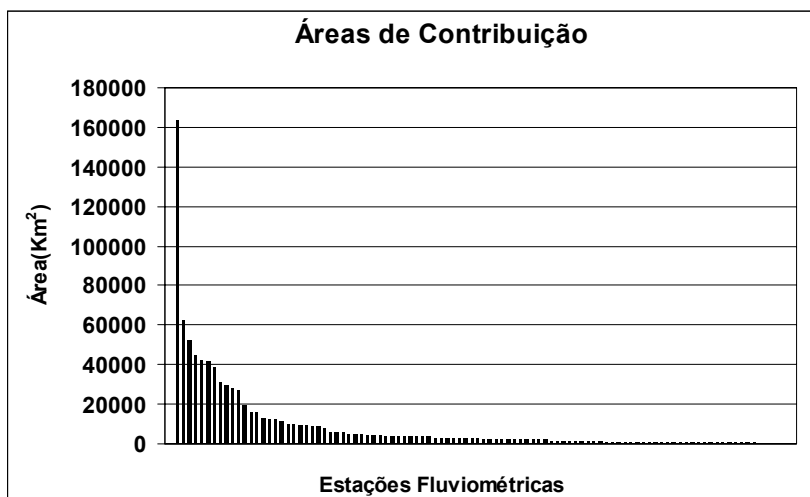


Figura A.1 – Histograma das áreas de contribuição da bacia até a seção transversal da estação.

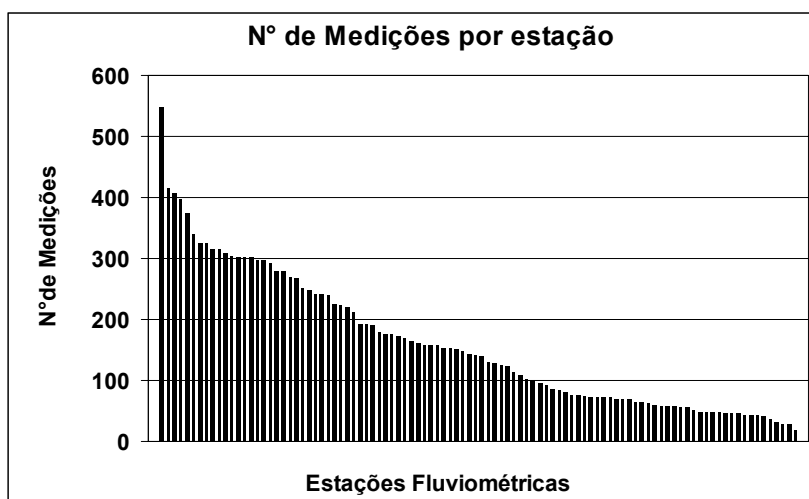


Figura A.2 – Histograma do número de medições por estação, no período de validade da curva-chave.

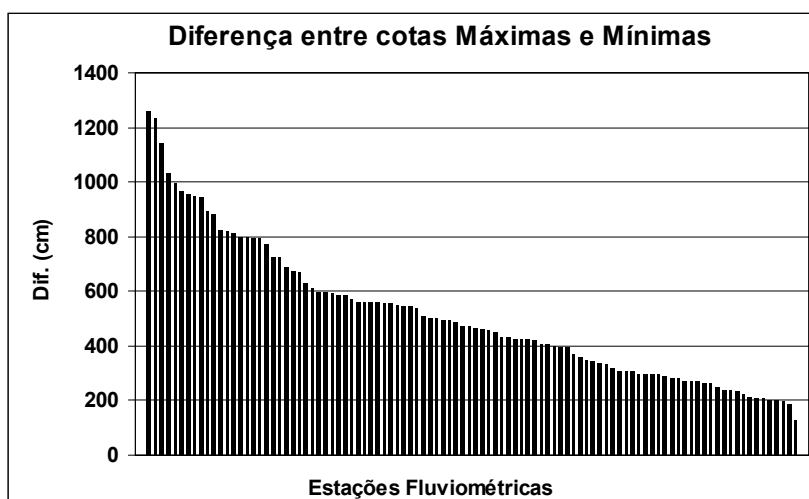


Figura A.3 – Histograma da amplitude das cotas medidas por estação.

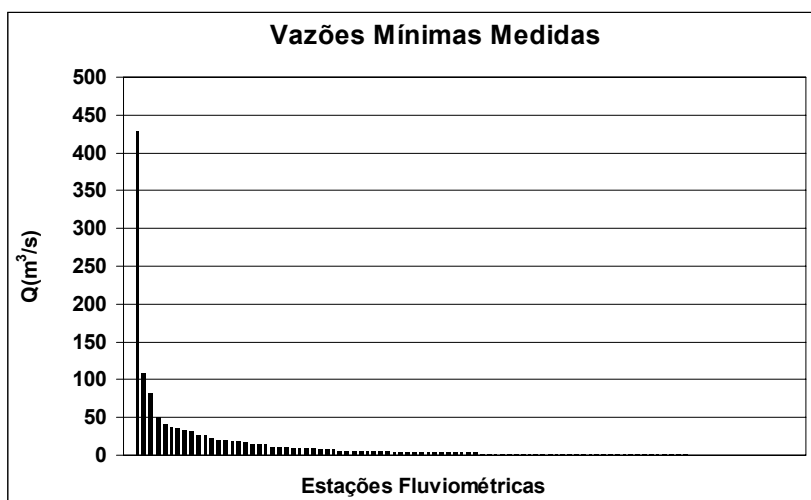


Figura A.4– Histograma das vazões mínimas medidas por estação.

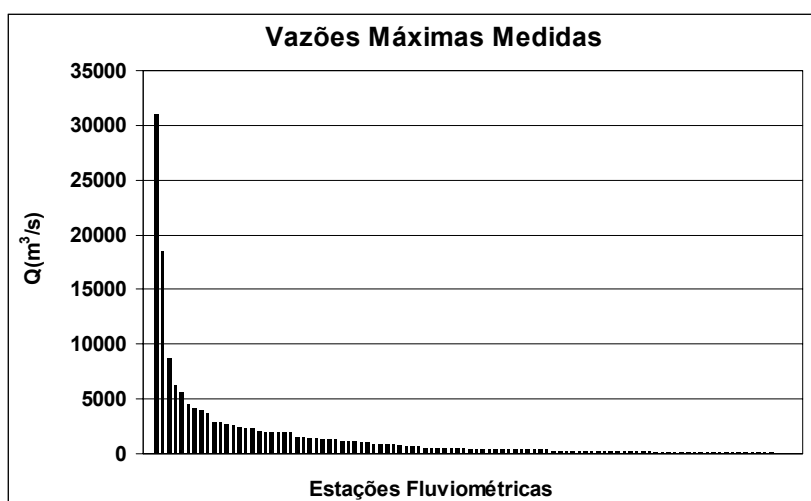


Figura A.5 – Histograma das vazões máximas medidas por estação.

ANEXO B: Avaliação de A_mCal e A_mMed

Tabela B.1 - Valores de Eh_{max} e Em calculados utilizando $A_m Med.$

ESTAÇÃO	Eh_{max}				Em			
	Stv	Man Log	VxA	VxA Log	Stv	Man Log	VxA	VxA Log
74900000 - SC	0.2387	0.7210	2.4791	0.0910	0.1672	0.4138	1.0933	0.0548
75400000 - SC	0.0863	0.9065	1.3827	0.1468	0.0182	0.3251	0.4769	0.0414
86440000 - SC	-0.1426	0.1327	-0.0627	-0.3317	0.0582	0.0551	0.0325	0.1601
85470000 - SE	-0.0748	1.1662	0.5237	0.0381	0.0780	0.5784	0.3583	0.1459
87905000 - SE	0.3853	0.4537	0.5565	0.2029	0.1174	0.1242	0.2166	0.0775
71250000 - SG	-0.2273	-0.0195	0.2132	-0.2732	0.1253	0.0270	0.0827	0.1474
74880000 - SG	-0.0664	0.3288	0.3568	-0.0343	0.0176	0.2502	0.1687	0.0206
75185000 - SG	0.0284	0.4523	0.7572	0.0763	0.0538	0.1676	0.3245	0.0441
76440000 - SG	-0.0650	0.2534	0.5429	0.0341	0.0246	0.1694	0.2730	0.0484
86745000 - SG	-0.4022	-0.1646	-0.0428	-0.3458	0.1718	0.0612	0.0141	0.1482
73960000 - SS	-0.2900	0.0363	0.0478	-0.2457	0.1488	0.0074	0.0083	0.1246
70700000 - SS	-0.1531	0.1097	0.1878	-0.1841	0.0819	0.0578	0.0971	0.1020
73550000 - SS	-0.1151	-0.0248	0.1841	-0.2263	0.0372	0.0079	0.0834	0.0973
86720000 - SS	0.0565	0.2861	0.4411	-0.0825	0.0507	0.1469	0.2215	0.0337

Tabela B.2 - Valores de Eh_{max} e Em calculados utilizando $A_m Cal.$

ESTAÇÃO	Eh_{max}				Em			
	Stv	Man Log	VxA	VxA Log	Stv	Man Log	VxA	VxA Log
74900000 - SC	-0.2976	0.1224	0.5755	0.2589	0.1082	0.1120	0.2482	0.1371
75400000 - SC	0.0464	0.9167	1.3625	0.0690	0.0115	0.3343	0.4730	0.0155
86440000 - SC	-0.2559	0.0440	-0.0769	-0.3093	0.1223	0.0135	0.0412	0.1479
85470000 - SE	-0.5288	-0.1520	-0.4116	-0.6126	0.1890	0.0365	0.1327	0.2270
87905000 - SE	0.3898	0.2756	0.5077	0.0680	0.1191	0.0870	0.1846	0.0311
71250000 - SG	-0.2189	-0.0269	0.0558	-0.1428	0.1181	0.0262	0.0185	0.0735
74880000 - SG	-0.0351	0.2212	0.2467	-0.0151	0.0114	0.1422	0.1003	0.0181
75185000 - SG	0.2404	0.4850	0.4714	0.2292	0.0863	0.1850	0.1764	0.0817
76440000 - SG	-0.0602	-0.1481	-0.0308	-0.1524	0.0249	0.0346	0.0096	0.0534
86745000 - SG	-0.3188	-0.1091	-0.0148	-0.2747	0.1258	0.0366	0.0091	0.1090
73960000 - SS	-0.0654	0.0622	0.1176	-0.1753	0.0271	0.0198	0.0474	0.0813
70700000 - SS	-0.1298	0.0554	0.1359	-0.2476	0.0684	0.0216	0.0632	0.1479
73550000 - SS	-0.1791	-0.0694	0.0680	-0.2049	0.0736	0.0298	0.0181	0.0922
86720000 - SS	-0.0509	0.1881	0.3041	-0.1720	0.0204	0.0878	0.1403	0.0923

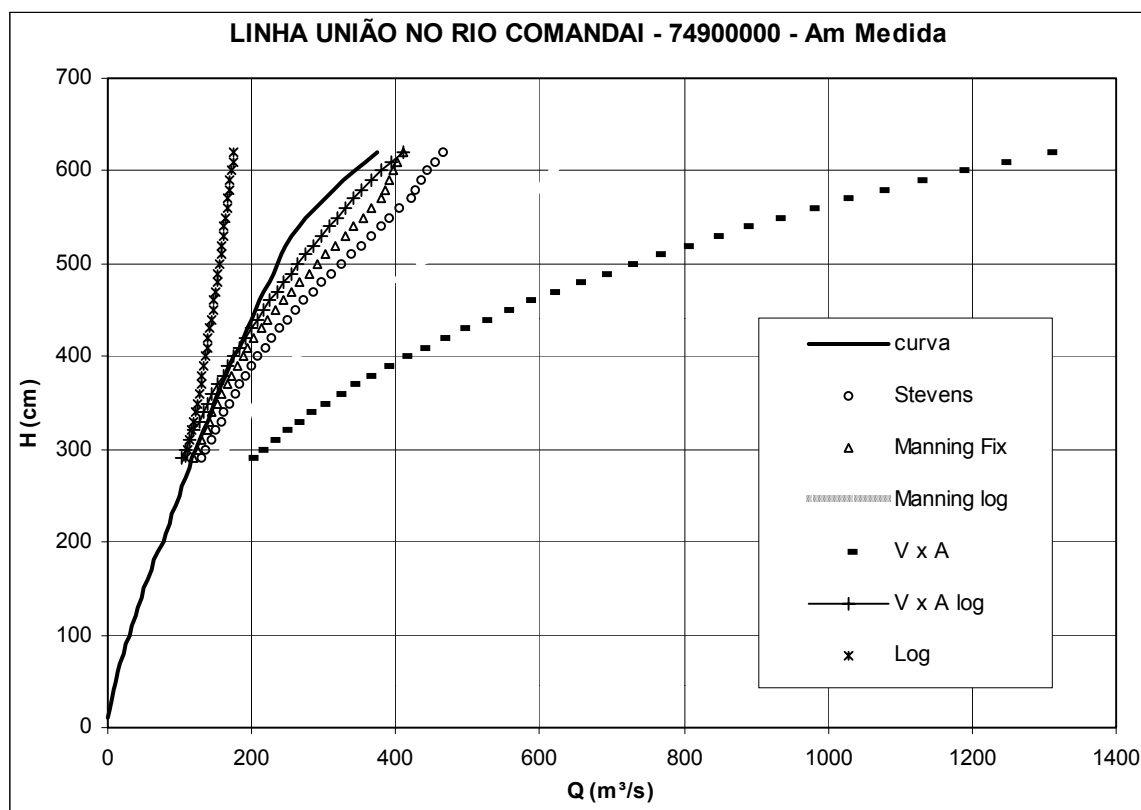
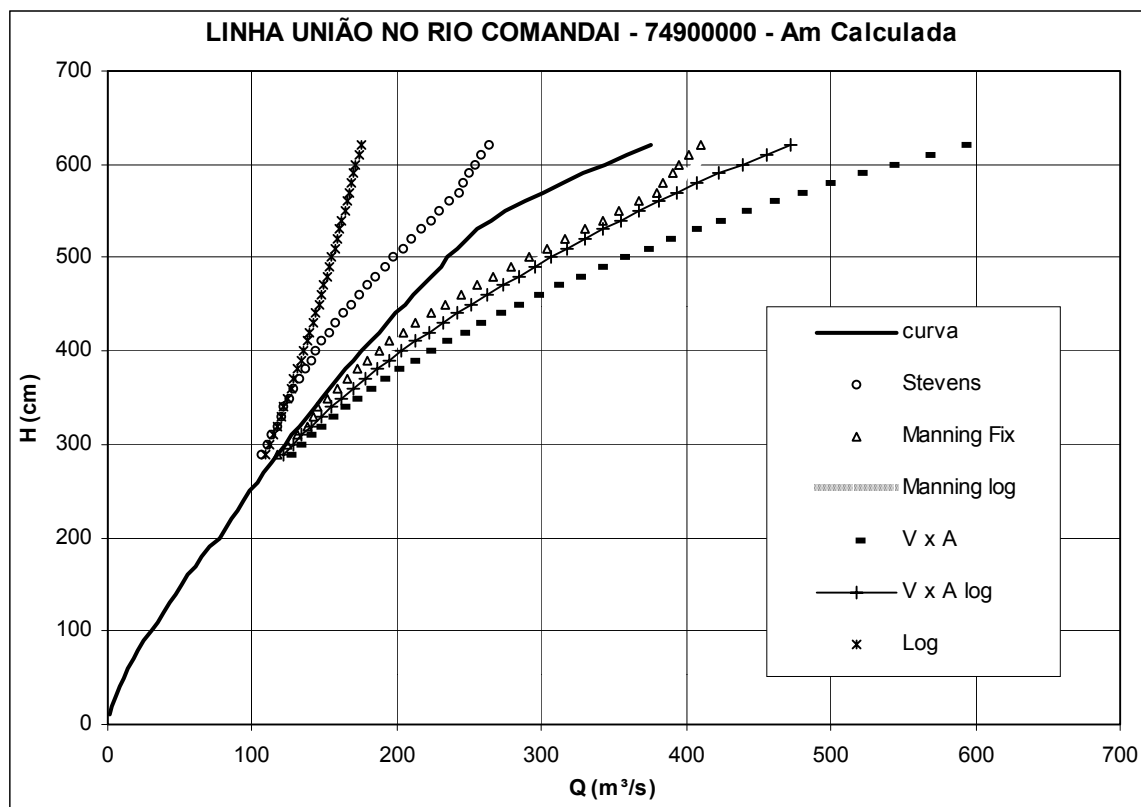


Figura B.1 - Pseudo-extrapolações a partir de A_{mCal} (fig. Superior) e A_{mMed} (fig. Inferior).

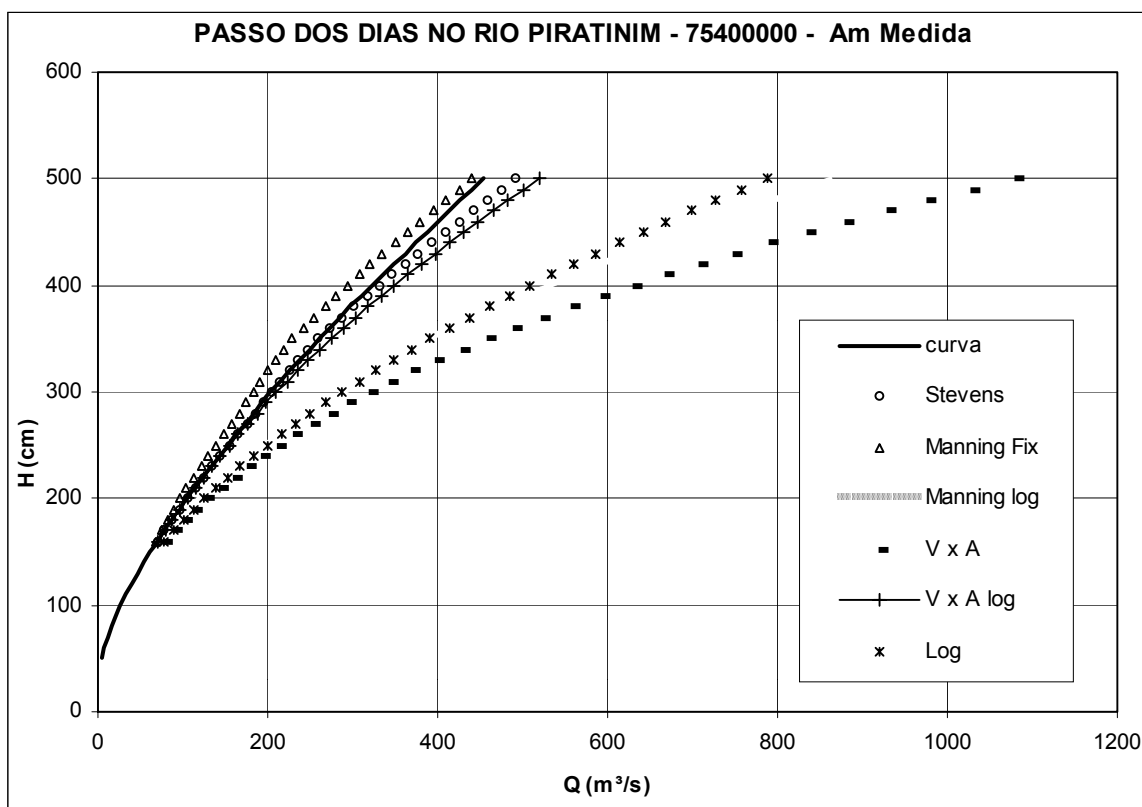
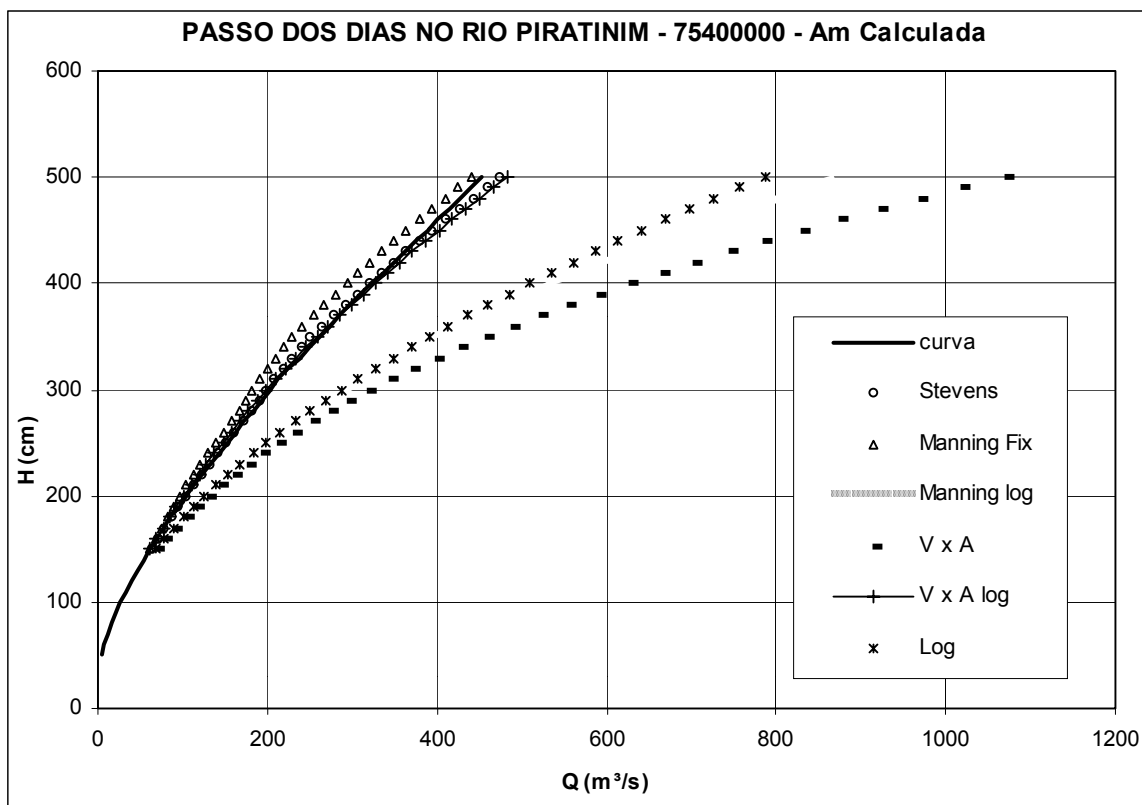


Figura B.2 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

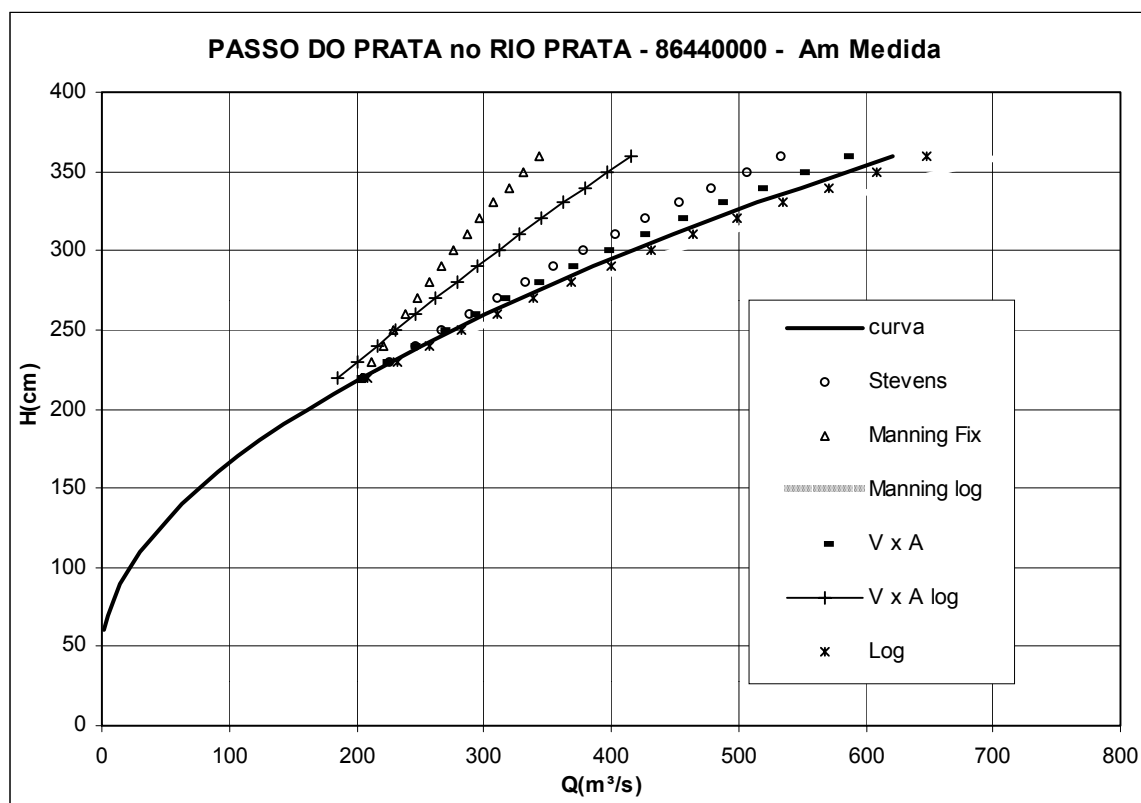
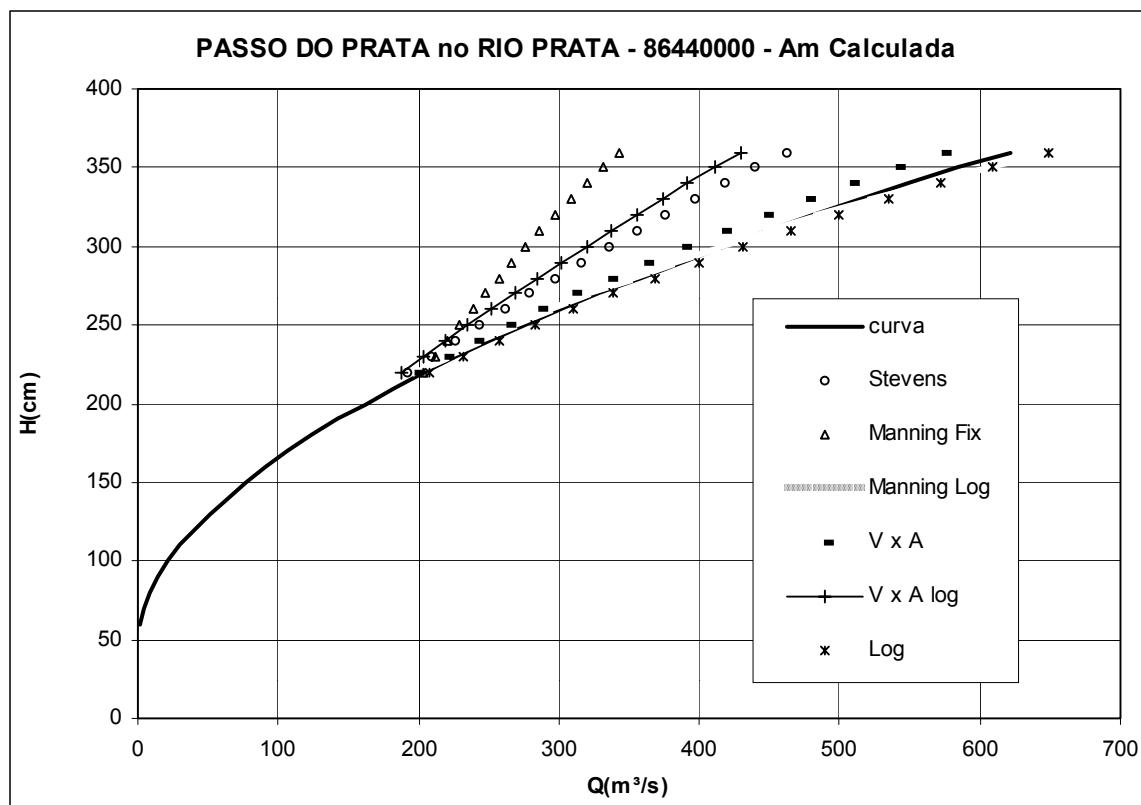


Figura B.3 - Pseudo-extrapolações a partir de A_{mCal} (fig. Superior) e A_{mMed} (fig. Inferior).

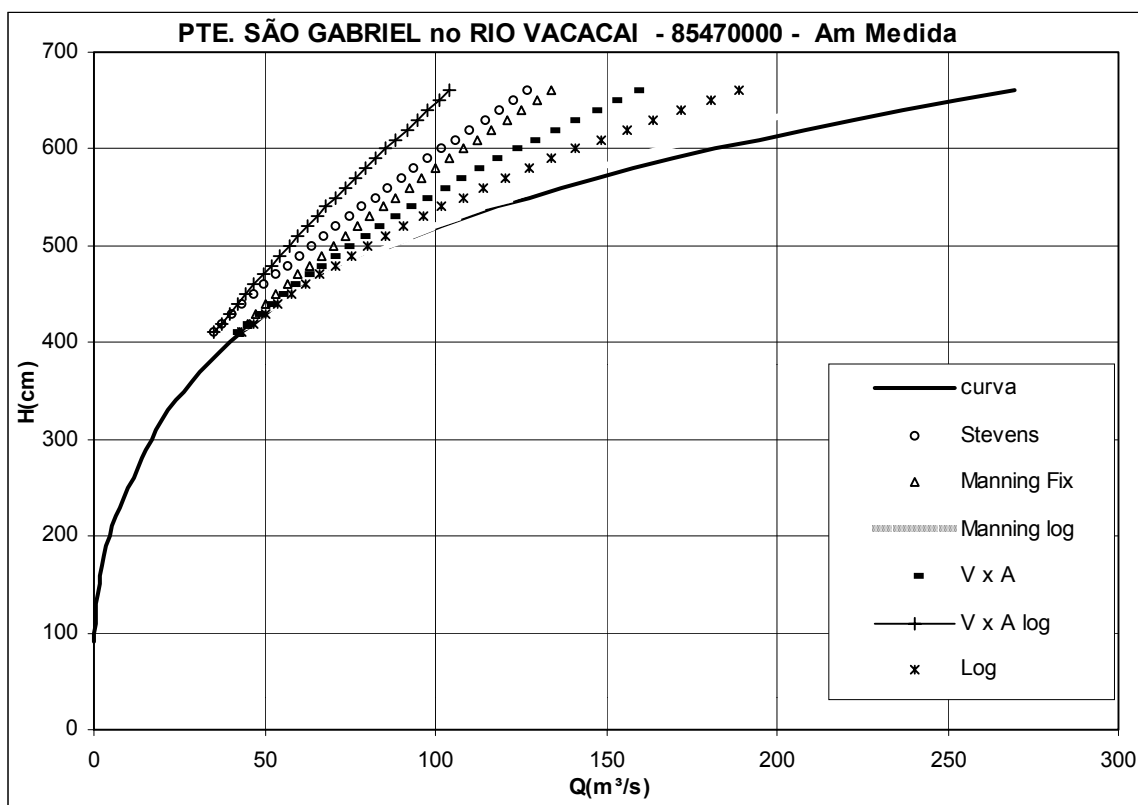
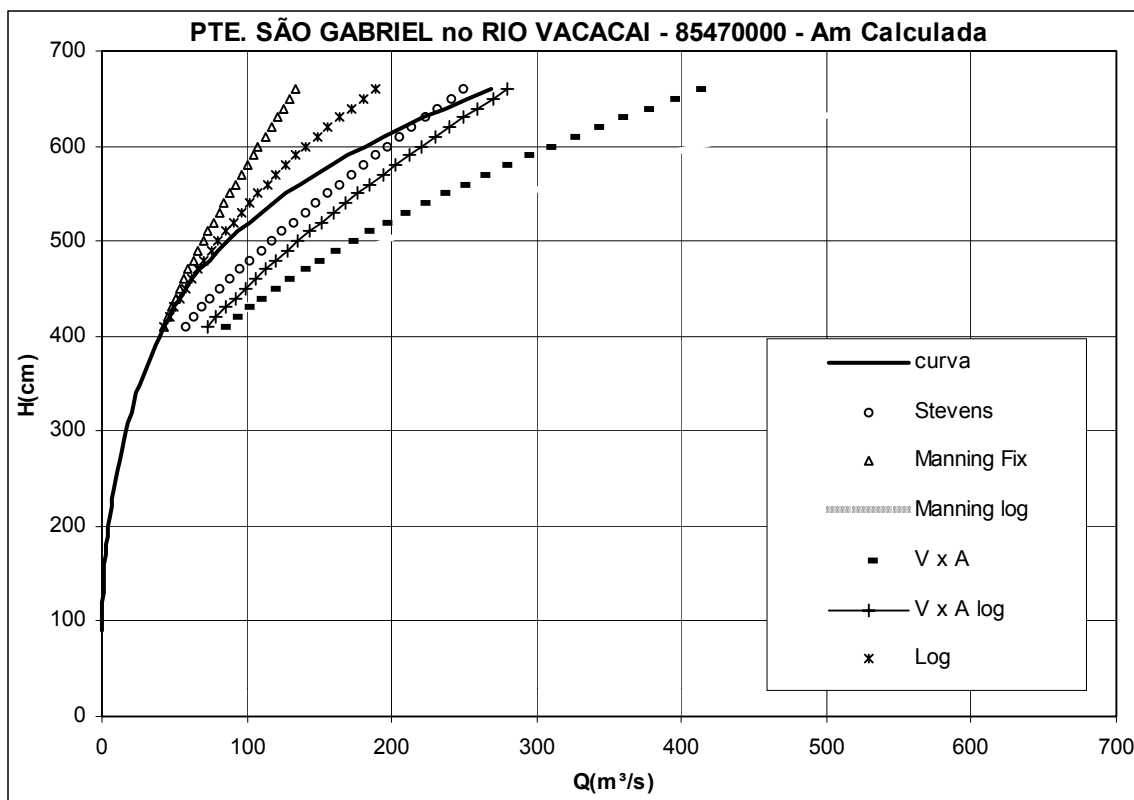


Figura B.4 - Pseudo-extrapolações a partir de A_mCal (fig. Superior) e A_mMed (fig. Inferior).

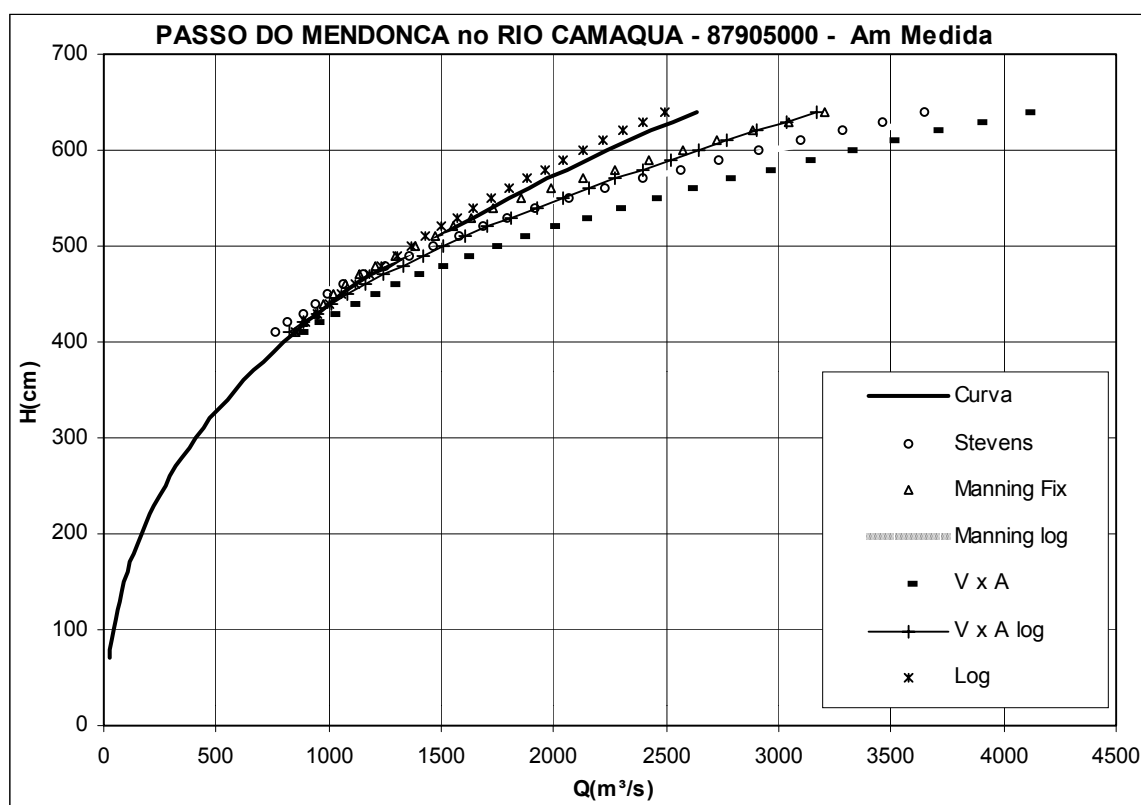
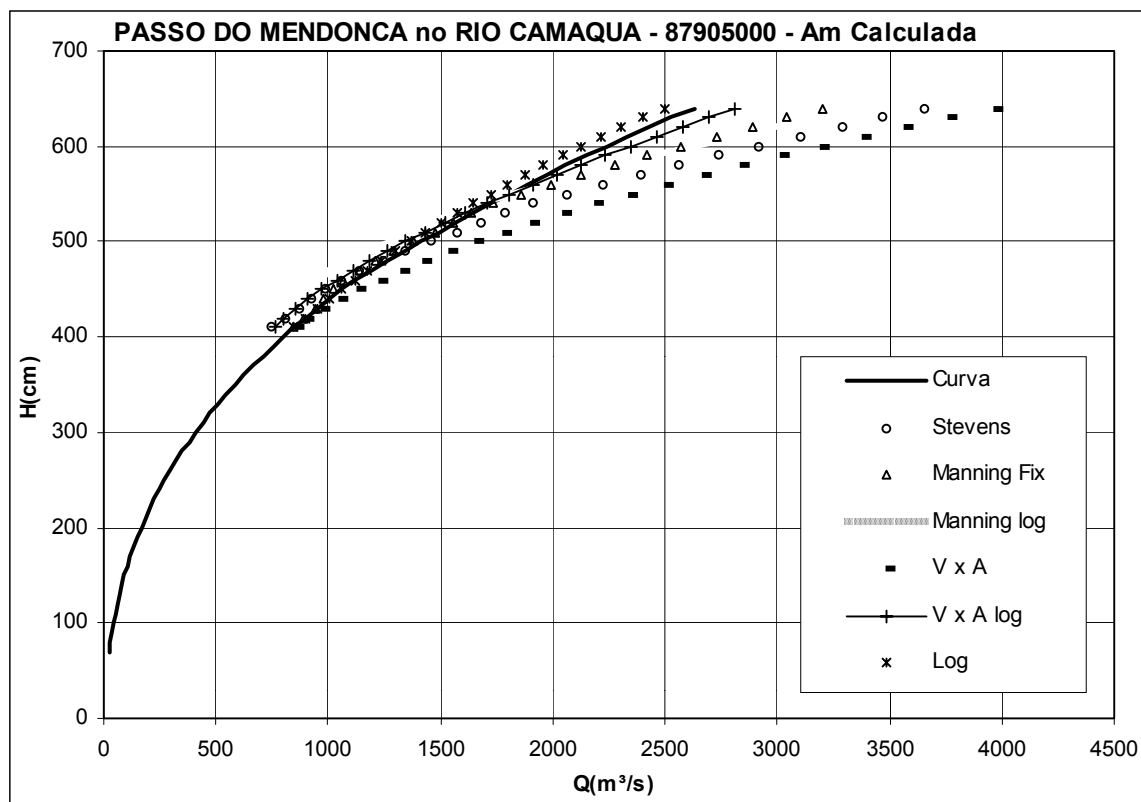


Figura B.5 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

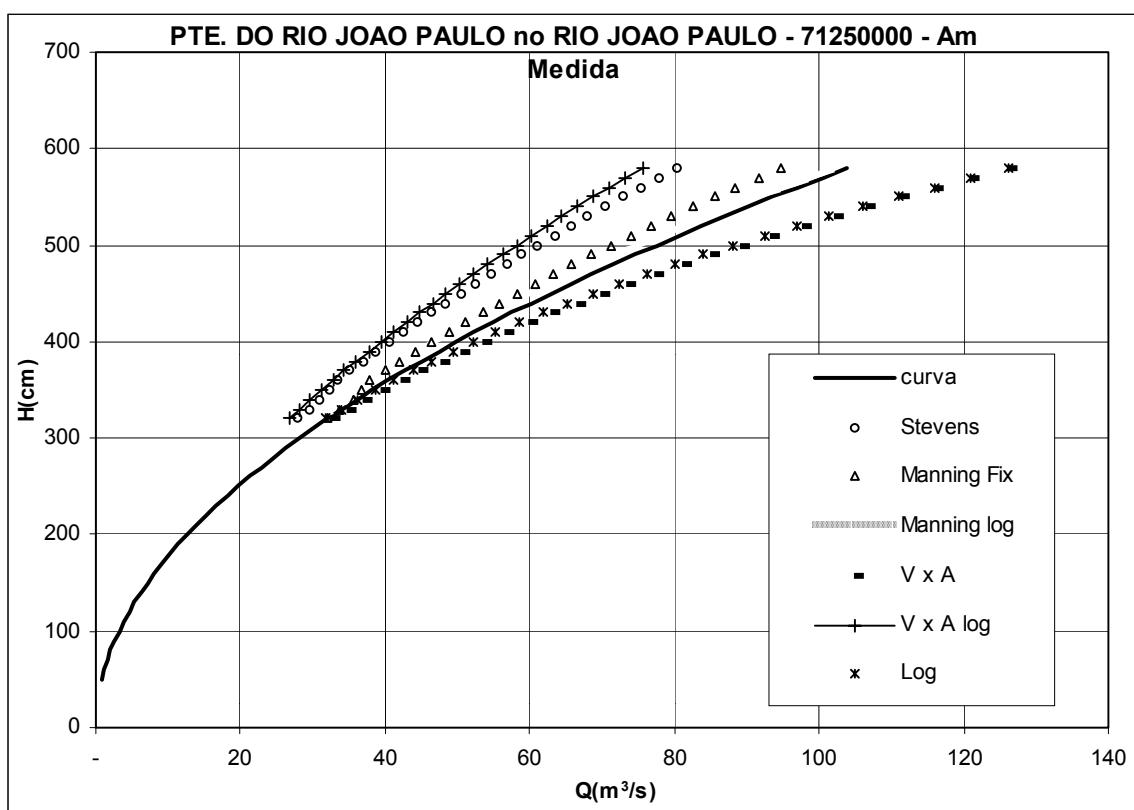
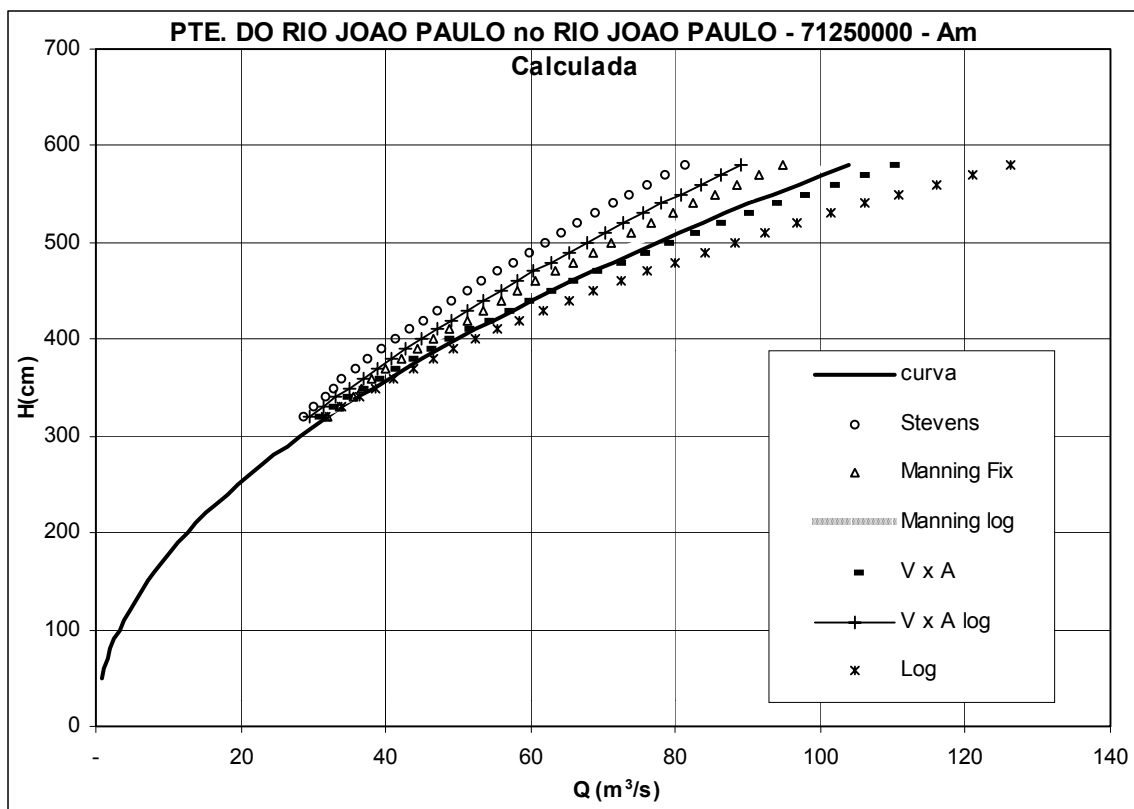


Figura B.6 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

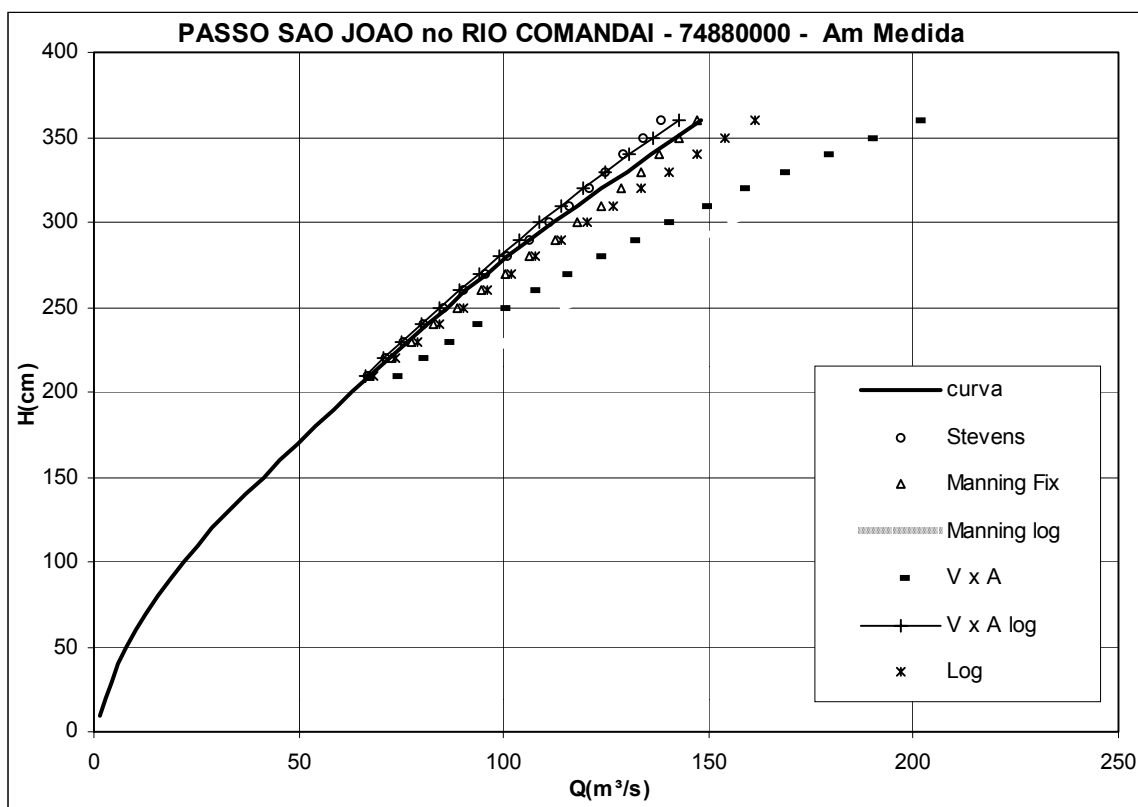
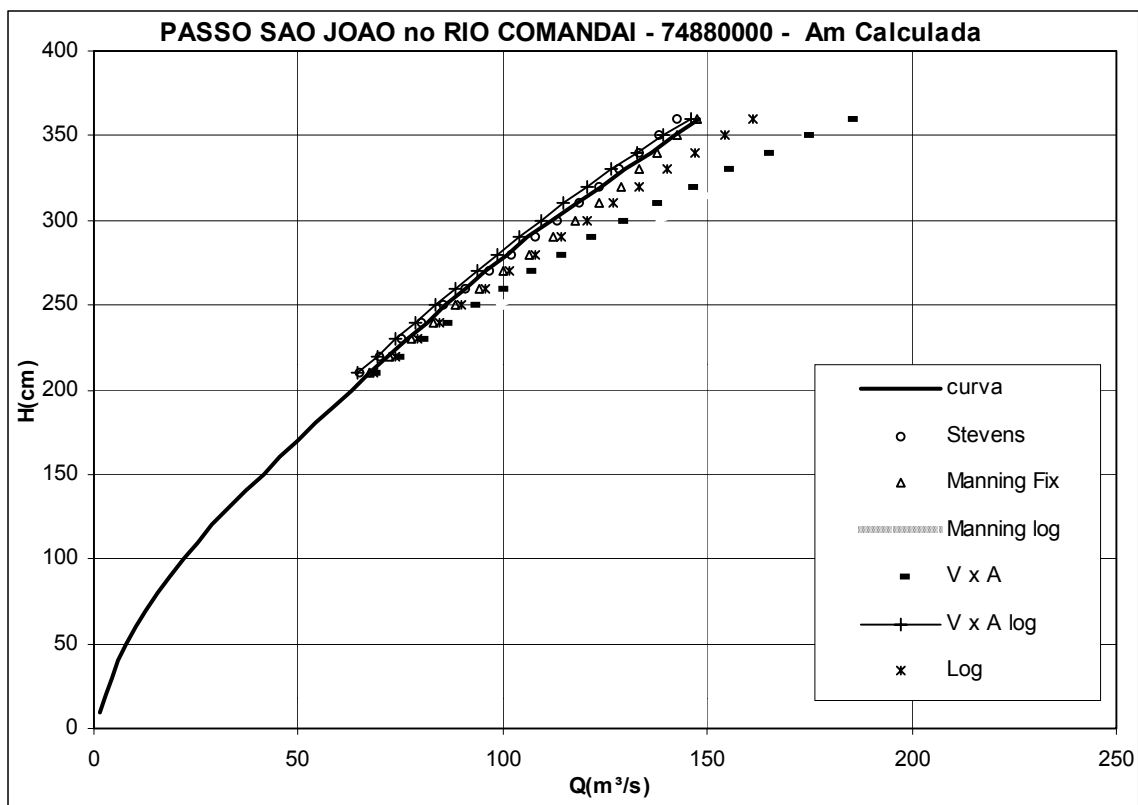


Figura B.7 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

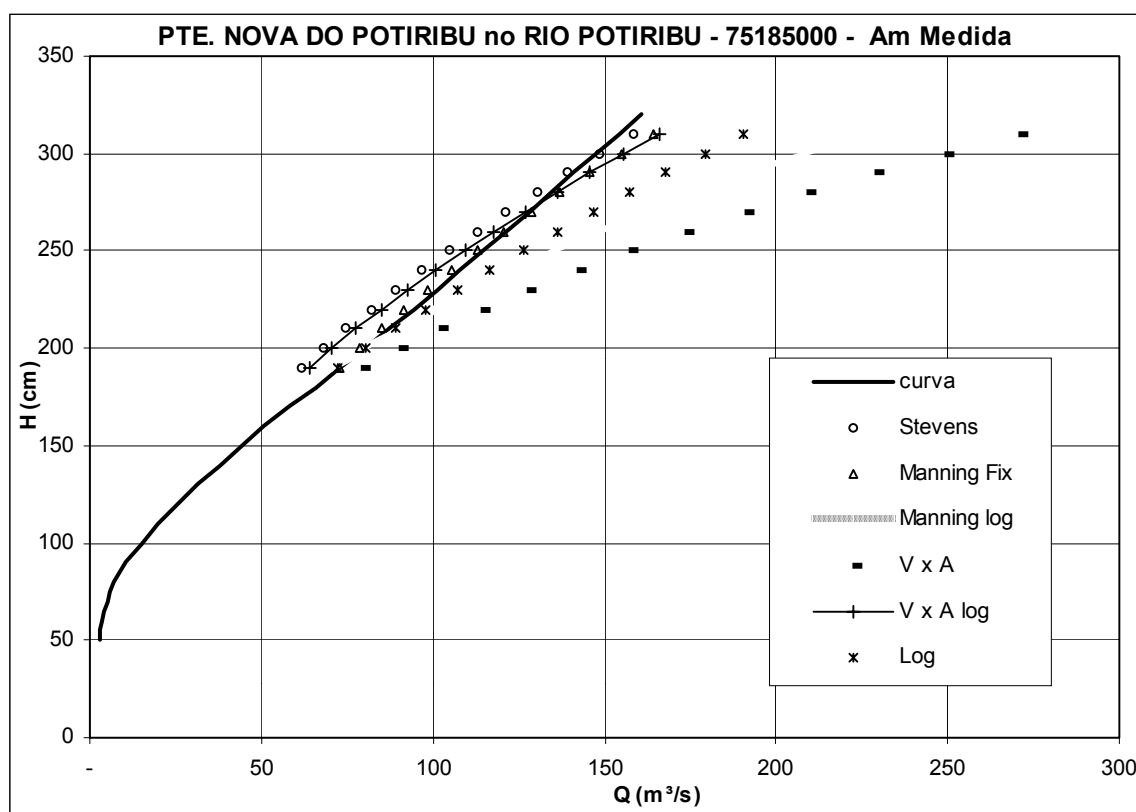
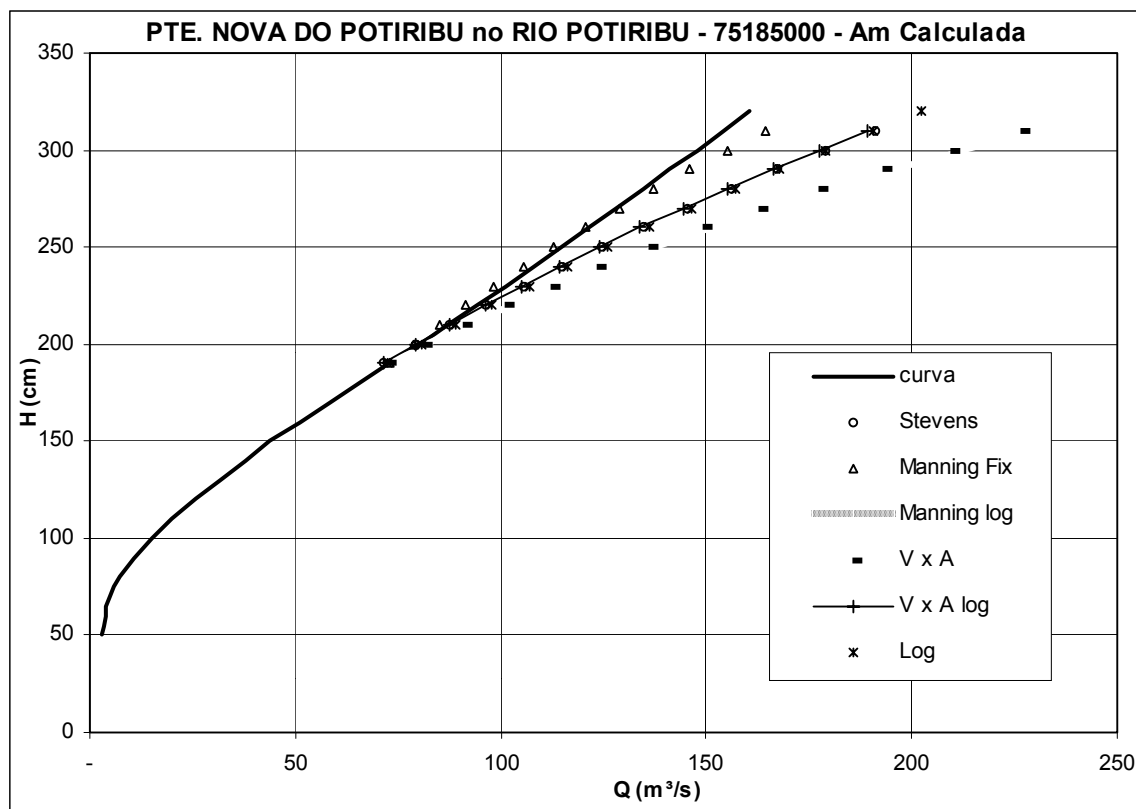


Figura B.8 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

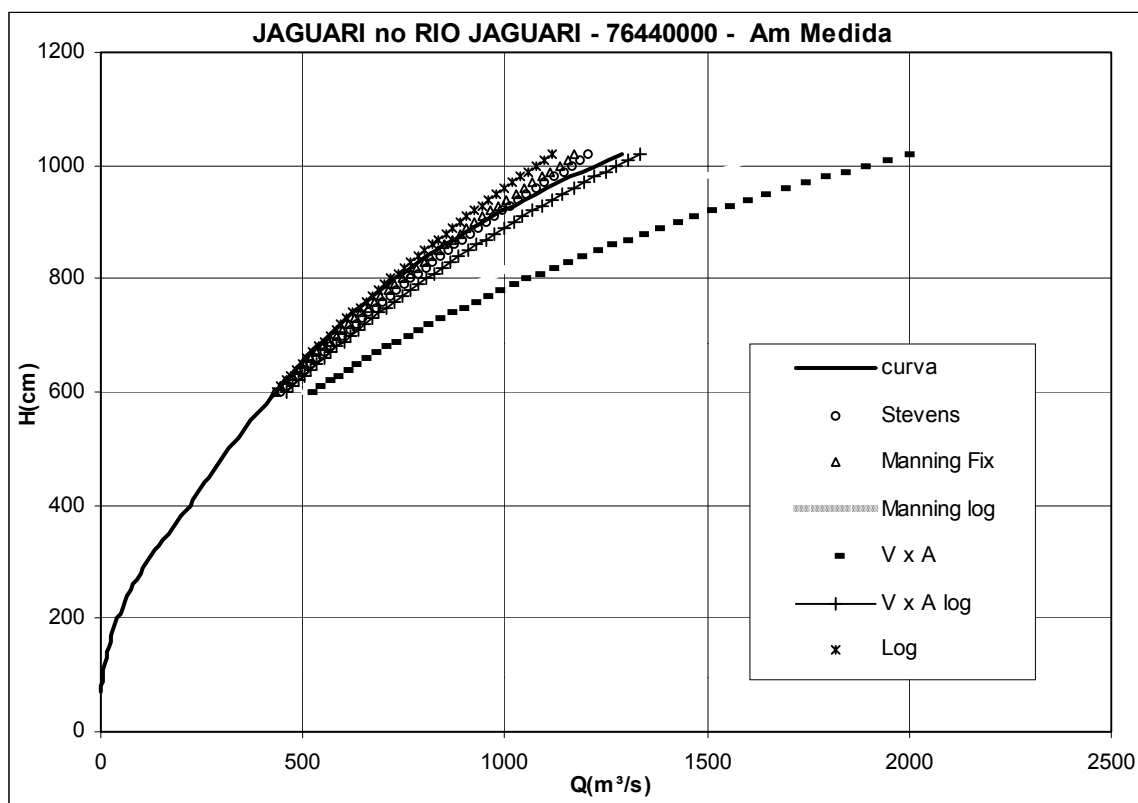
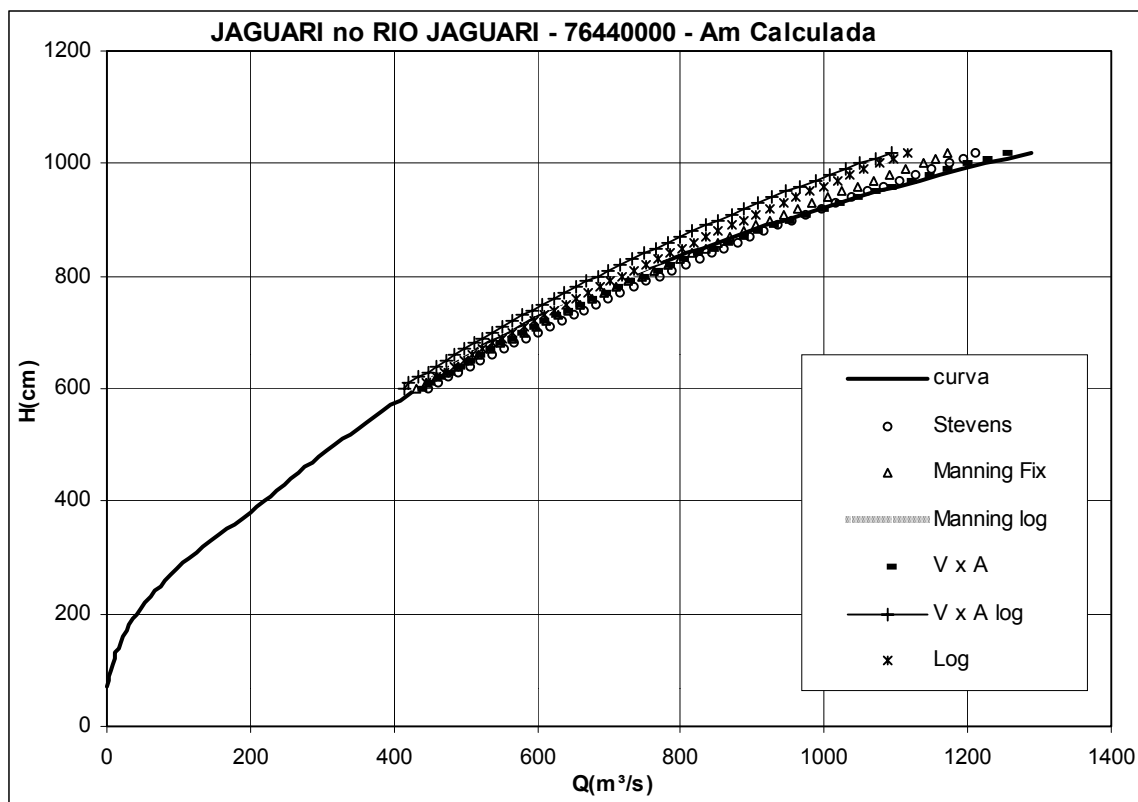


Figura B.9 - Pseudo-extrapolações a partir de A_m Cal (fig. Superior) e A_m Med (fig. Inferior).

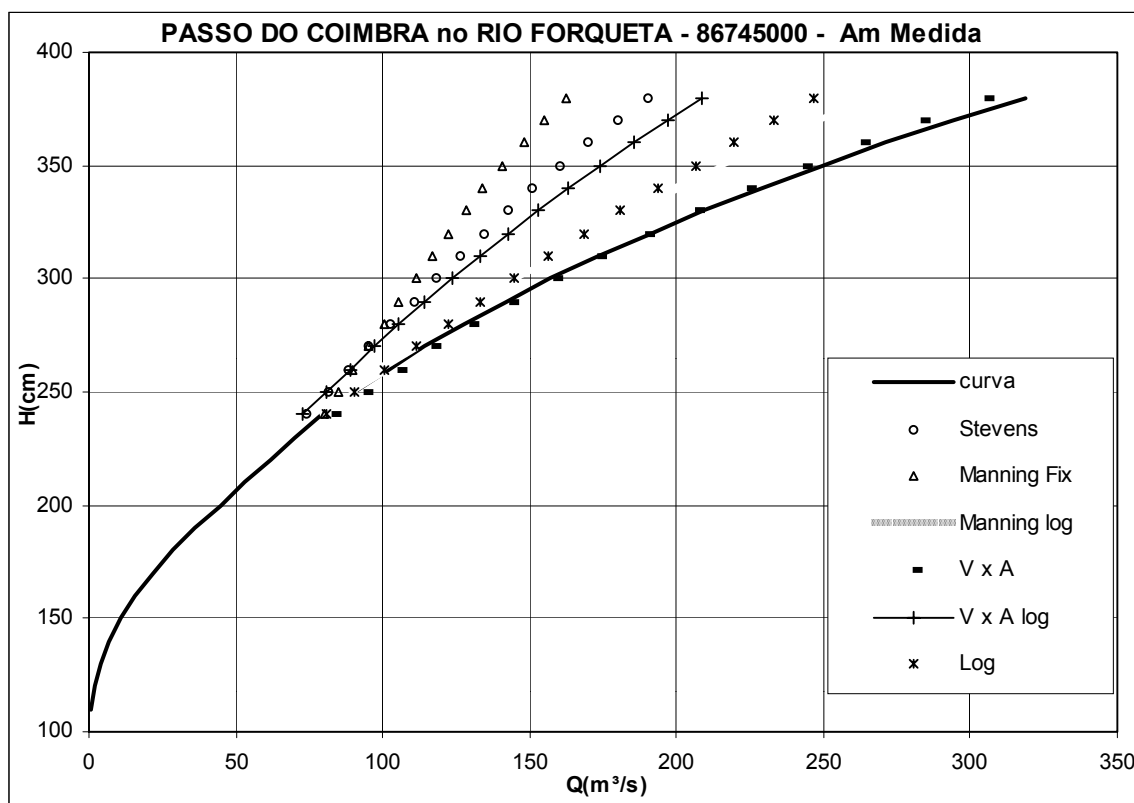
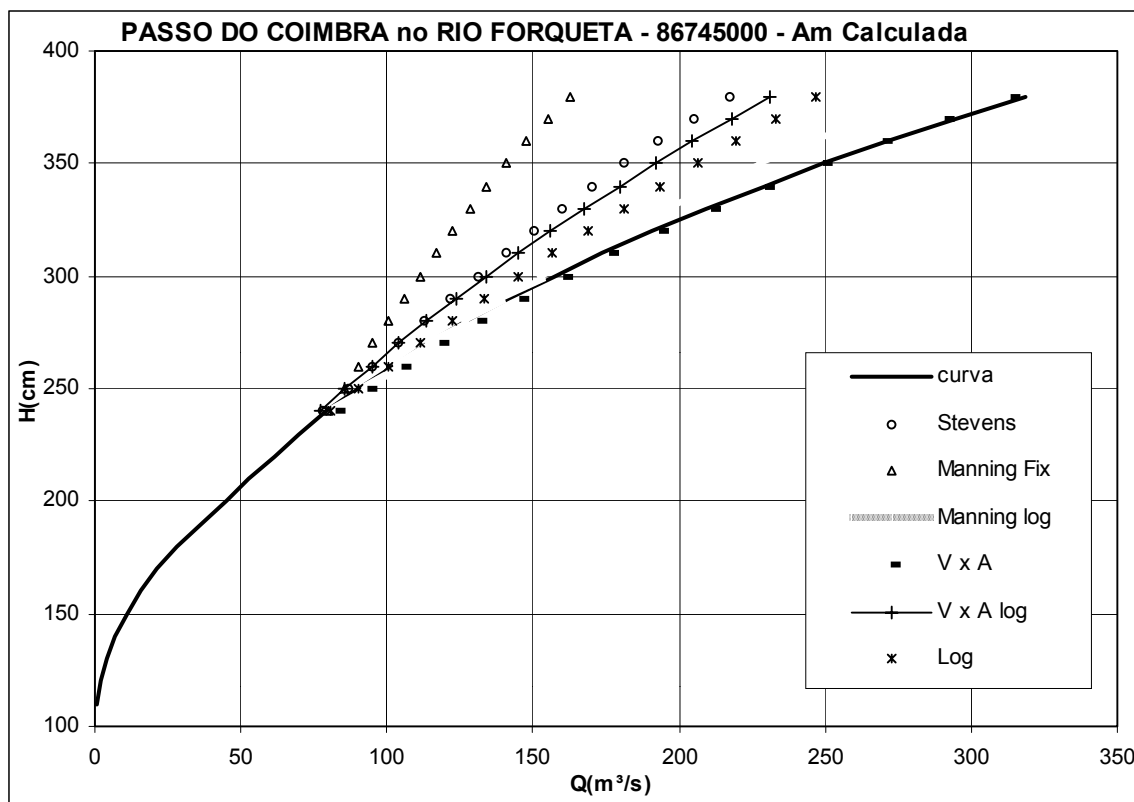


Figura B.10 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m\text{Cal}$ (fig. Superior) e $A_m\text{Med}$ (fig. Inferior).

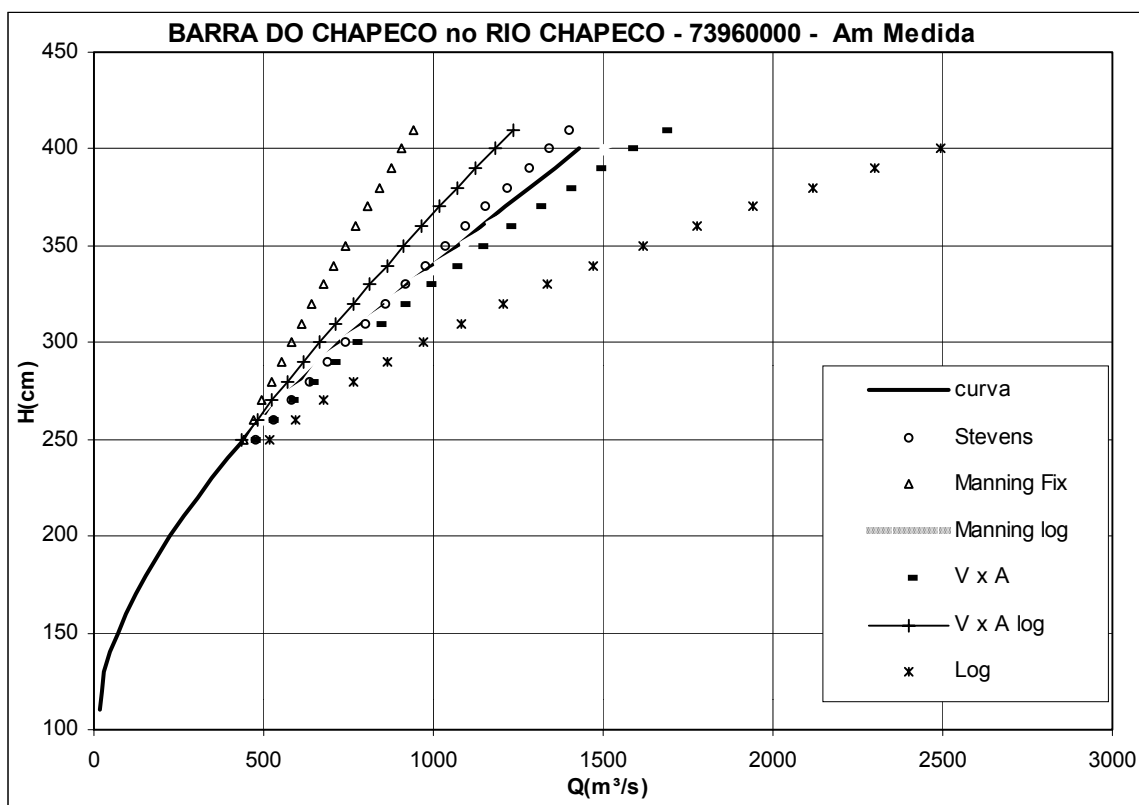
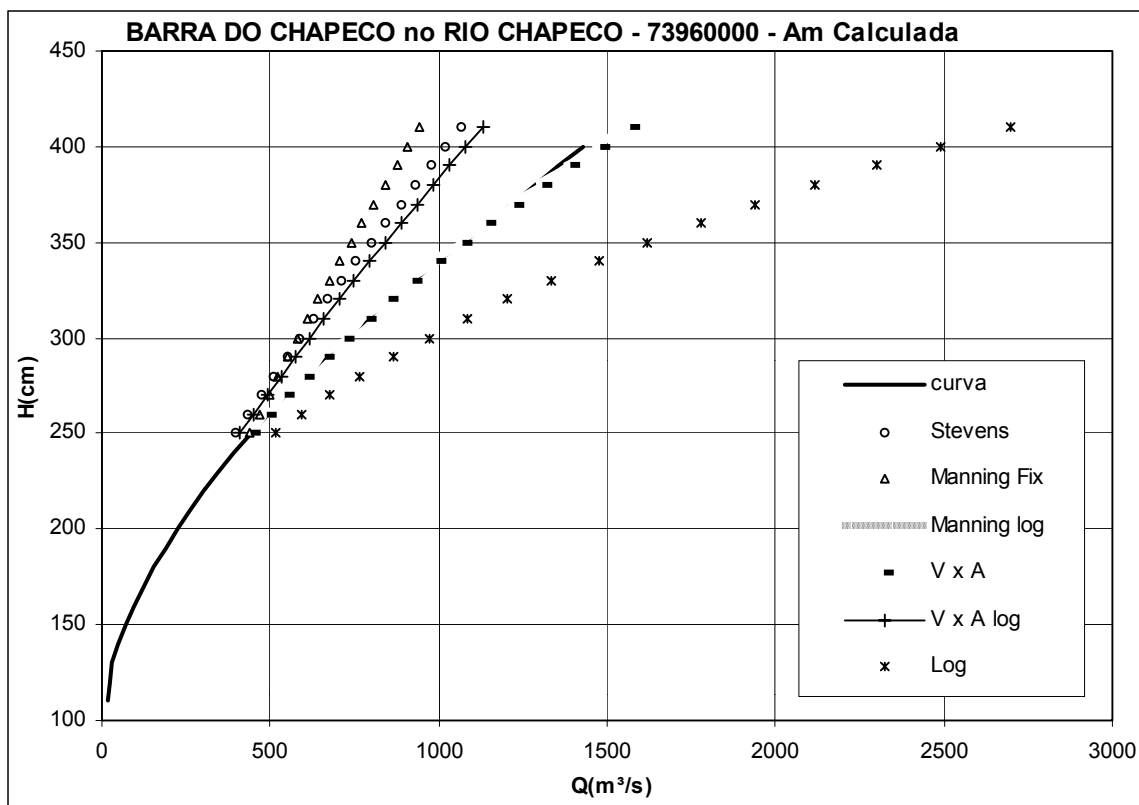


Figura B.11 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

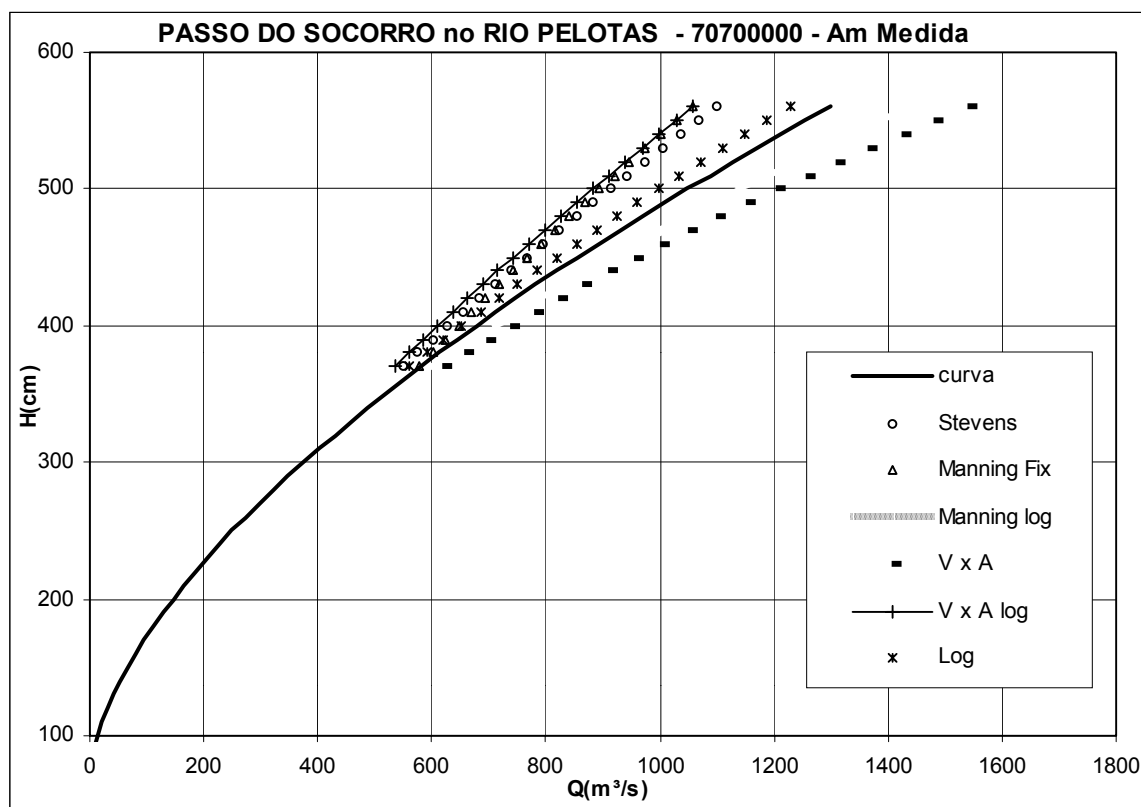
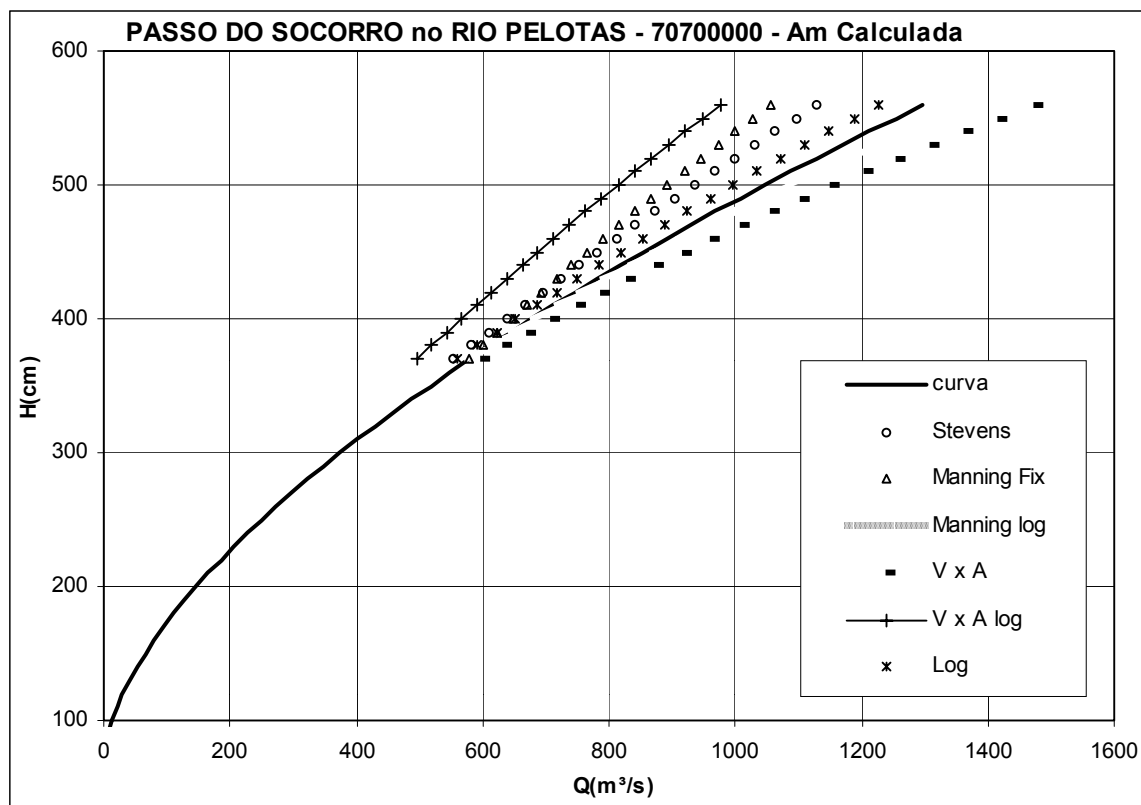


Figura B.12 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

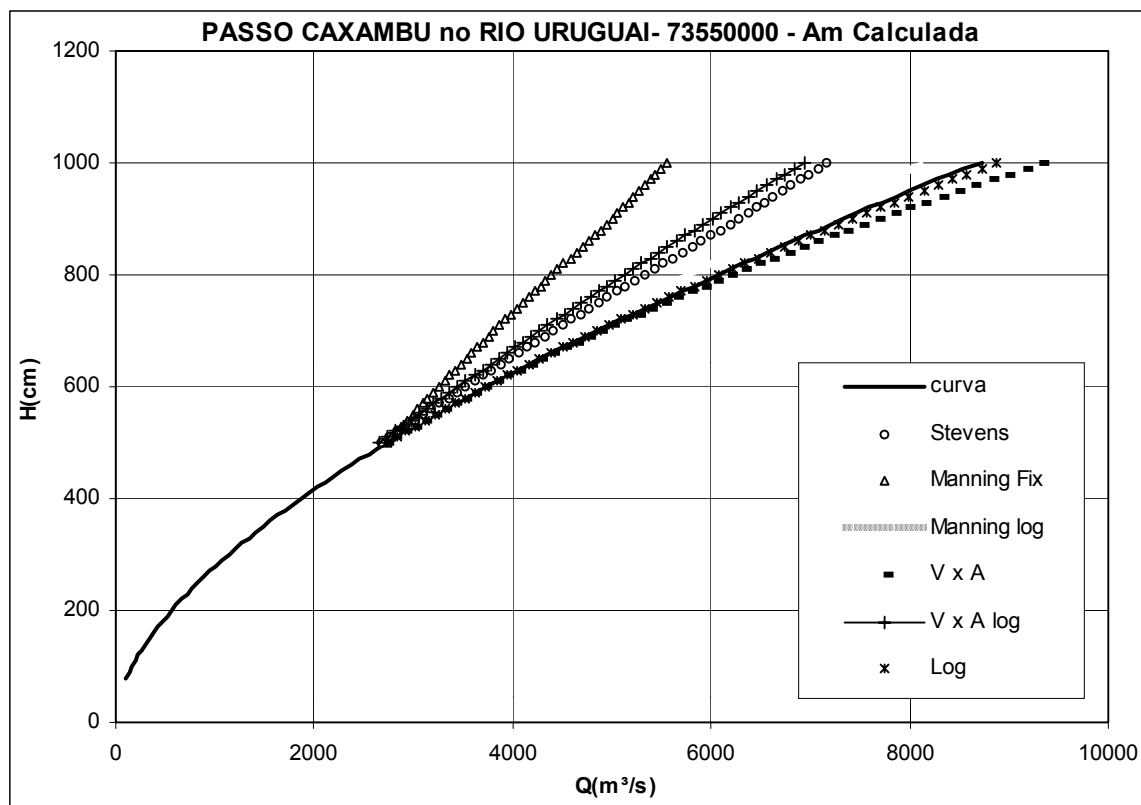


Figura B.13 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

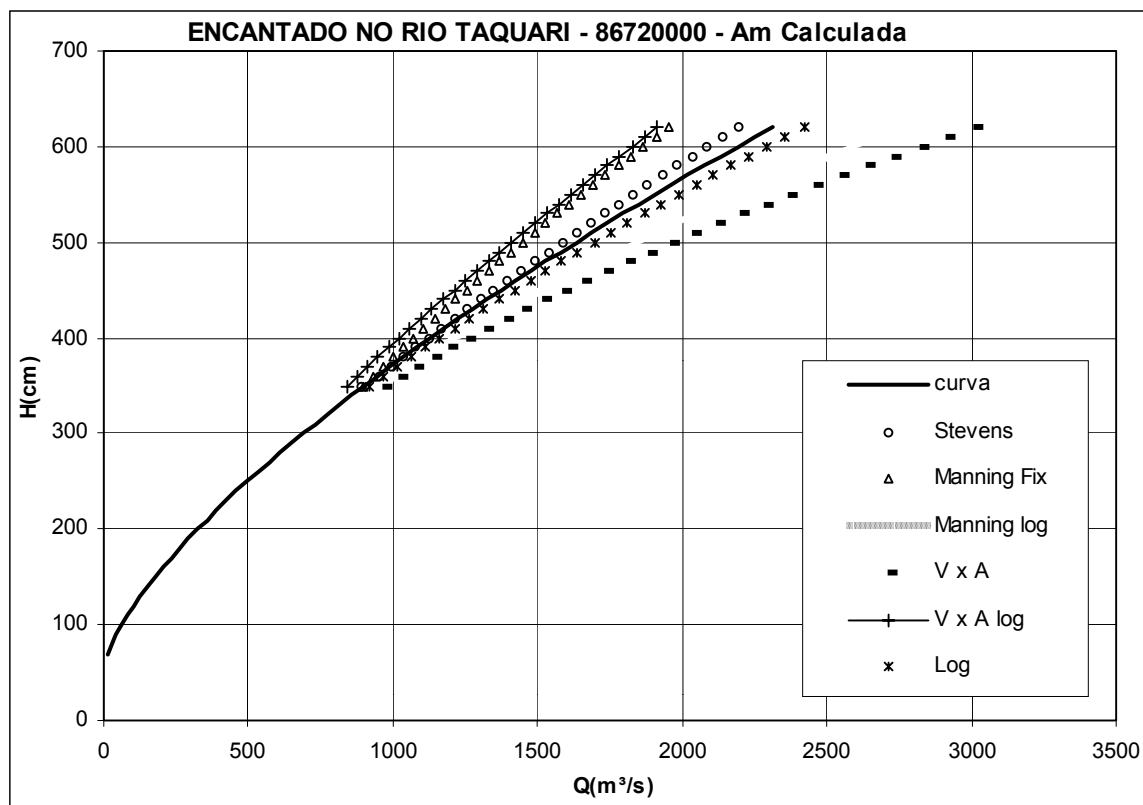


Figura B.14 - Pseudo-extrapolações a partir de $A_m Cal$ (fig. Superior) e $A_m Med$ (fig. Inferior).

ANEXO C : Valores calculados de Eh_{max} e Em das estações Analisadas.

Tabela C.4 – Classificação dos valores de Eh_{max} e Em por método de extrapolação nas estações com seções padrão tipo SE e SG.

TIPO	Eh_{max}						Em					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
SE	A	A	A	A	B	B	A	A	A	A	A	A
	B	D	B	A	C	B	A	B	A	A	A	A
	B	E	B	B	D	C	A	B	A	B	A	A
	E	E	D	E	D	C	B	B	A	B	B	A
	E	E	E	E	D	C	C	C	B	B	B	A
	E	E	E	E	E	D	C	D	C	B	B	B
	E	E	E	E	E	E	D	D	E	C	C	B
	E	E	-	E	E	E	E	D	-	C	C	C
	-	-	-	E	E	E	-	-	-	C	C	C
	-	-	-	E	E	E	-	-	-	C	C	C
	-	-	-	E	E	E	-	-	-	D	C	C
	-	-	-	E	E	E	-	-	-	D	E	C
	-	-	-	E	E	E	-	-	-	D	E	C
	-	-	-	-	E	E	-	-	-	-	E	E
SG	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
	B	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A
	B	A	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A
	B	B	C	B	C	A	A	A	A	A	B	A
	B	B	C	C	C	A	A	A	A	A	B	A
	B	B	C	C	C	B	A	A	A	B	B	A
	C	B	C	D	C	B	A	A	B	B	B	A
	C	B	C	E	C	B	A	A	B	B	B	A
	C	C	D	E	C	B	A	B	B	B	B	A
	C	C	D	E	D	B	B	B	B	B	B	A
	C	D	D	E	D	B	B	B	B	B	B	A
	C	D	D	E	D	B	B	B	B	B	B	A
	C	D	E	E	E	B	B	B	C	B	B	A
	C	D	E	E	E	B	B	B	C	C	B	A
	D	D	E	E	E	B	B	B	C	C	C	A
	D	E	E	E	E	C	B	B	C	C	C	A
	D	E	E	E	E	C	B	B	C	C	C	B
	D	E	E	E	E	C	B	C	D	C	E	B
	D	E	E	E	-	C	C	C	D	D	-	B
	E	E	E	E	-	D	C	C	D	D	-	B
	E	E	E	E	-	E	C	C	E	D	-	B
	E	E	E	E	-	E	C	C	E	D	-	B
	E	E	-	E	-	E	C	C	-	D	-	B
	E	E	-	E	-	E	C	C	-	E	-	B
	E	E	-	E	-	E	C	D	-	E	-	B
	E	E	-	E	-	E	C	D	-	E	-	C
	E	E	-	E	-	E	C	D	-	E	-	C
	E	E	-	E	-	E	C	E	-	E	-	C
E	E	-	E	-	E	D	E	-	E	-	E	
-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	E	
-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	E	

A	Diferença percentual entre 0% e 5% (inclusive)
B	Diferença percentual entre 5% e 10% (inclusive)
C	Diferença percentual entre 10% e 15% (inclusive)
D	Diferença percentual entre 15% e 20% (inclusive)
E	Diferença percentual maior que 20%
-	Impossibilidade de aplicação do método (falha)

Tabela C.5 – Classificação dos valores de Eh_{max} e Em por método de extrapolação nas estações com seções padrão tipo SC e SS.

TIPO	Eh_{max}						Em					
	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG	Stv	Man Fix	Man Log	VxA	VxA Log	LOG
SC	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	C	B	B	B	B	A	B	A	A	A	A	A
	C	C	C	B	B	A	B	B	A	A	A	A
	C	D	C	C	B	A	B	B	B	A	A	A
	C	D	C	D	B	B	B	B	B	B	A	A
	D	E	D	D	B	C	B	C	B	B	A	A
	D	E	E	E	E	C	B	C	C	B	B	B
	E	E	E	E	E	C	B	C	D	B	B	B
	E	E	E	E	D	D	C	C	D	B	B	B
	E	E	E	E	D	E	C	C	E	C	B	C
	E	E	-	E	E	E	C	C	-	C	C	C
	E	E	-	E	E	E	D	D	-	D	C	C
	E	E	-	E	E	E	D	E	-	E	C	D
	E	-	-	E	E	E	E	E	-	E	C	D
	-	-	-	E	E	E	-	-	-	E	D	D
	-	-	-	E	E	E	-	-	-	E	D	E
-	-	-	E	E	E	-	-	-	E	E	E	
-	-	-	E	E	E	-	-	-	E	E	E	
-	-	-	E	-	E	-	-	-	E	-	E	
-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	E	
SS	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	A	B	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
	A	B	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
	A	C	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A
	A	C	A	B	D	A	A	A	A	A	B	A
	A	C	B	B	D	A	A	B	A	A	B	A
	B	C	B	B	D	A	A	B	A	A	B	A
	B	D	B	B	D	A	A	B	A	A	B	A
	B	D	B	B	E	A	A	B	A	A	B	A
	B	D	B	B	E	A	A	B	A	A	C	A
	B	D	B	B	E	B	A	B	A	A	C	A
	B	D	B	C	E	B	A	B	A	A	D	A
	B	E	B	C	E	B	A	B	B	A	E	A
	B	E	B	C	-	B	A	C	B	B	-	A
	C	E	C	D	-	B	A	C	B	B	-	B
	C	E	C	D	-	C	B	C	B	B	-	B
	C	E	D	D	-	C	B	C	B	B	-	B
	C	E	D	D	-	D	B	C	B	B	-	B
	C	E	D	D	-	D	B	C	B	B	-	B
	D	E	D	E	-	D	B	D	B	B	-	B
	D	E	D	E	-	D	B	D	B	B	-	B
	D	E	D	E	-	D	B	D	B	C	-	B
	D	E	E	E	-	E	B	D	B	C	-	B
	D	E	E	E	-	E	B	D	B	C	-	C
E	E	E	E	-	E	B	D	C	C	-	C	
E	E	E	E	-	E	C	D	C	D	-	D	
E	E	-	E	-	E	C	E	-	D	-	D	
E	E	-	E	-	E	D	E	-	D	-	E	
-	-	-	E	-	E	-	-	-	E	-	E	

A	Diferença percentual entre 0% e 5% (inclusive)
B	Diferença percentual entre 5% e 10% (inclusive)
C	Diferença percentual entre 10% e 15% (inclusive)
D	Diferença percentual entre 15% e 20% (inclusive)
E	Diferença percentual maior que 20%
-	Impossibilidade de aplicação do método (falha)

A N E X O D : Curvas-chave das Estações Fluviométricas Utilizadas.

O Anexo D contém os gráficos das curvas-chave e pseudo-extrapolações das 100 estações analisadas juntamente com os gráficos de apoio para aplicação dos métodos de extrapolação: Stevens – $A_m R_h^{1/2} x Q$; VxA e $VxA \text{ Log} - HxV$ e Manning Log - HxK_m . As equações das linhas de tendência e seus respectivos coeficientes de correlação com os pontos (R^2), também são apresentados. A sequência de colocação das estações está em ordem crescente de acordo com seus respectivos códigos.

Cabe uma observação sobre os gráficos HxK_m e K_mxH contidos em cada página. O primeiro é apresentado com o propósito de mostrar a evolução de K_m com a cota. O segundo é o mesmo gráfico com os eixos trocados, obrigatório para se determinar através da planilha a equação da linha de tendência de K_m como função de H , ambos referentes ao método Manning Log.

Finalmente dentro do gráfico da curva-chave está o gráfico do perfil transversal da seção escolhida para aplicação dos métodos de extrapolação.

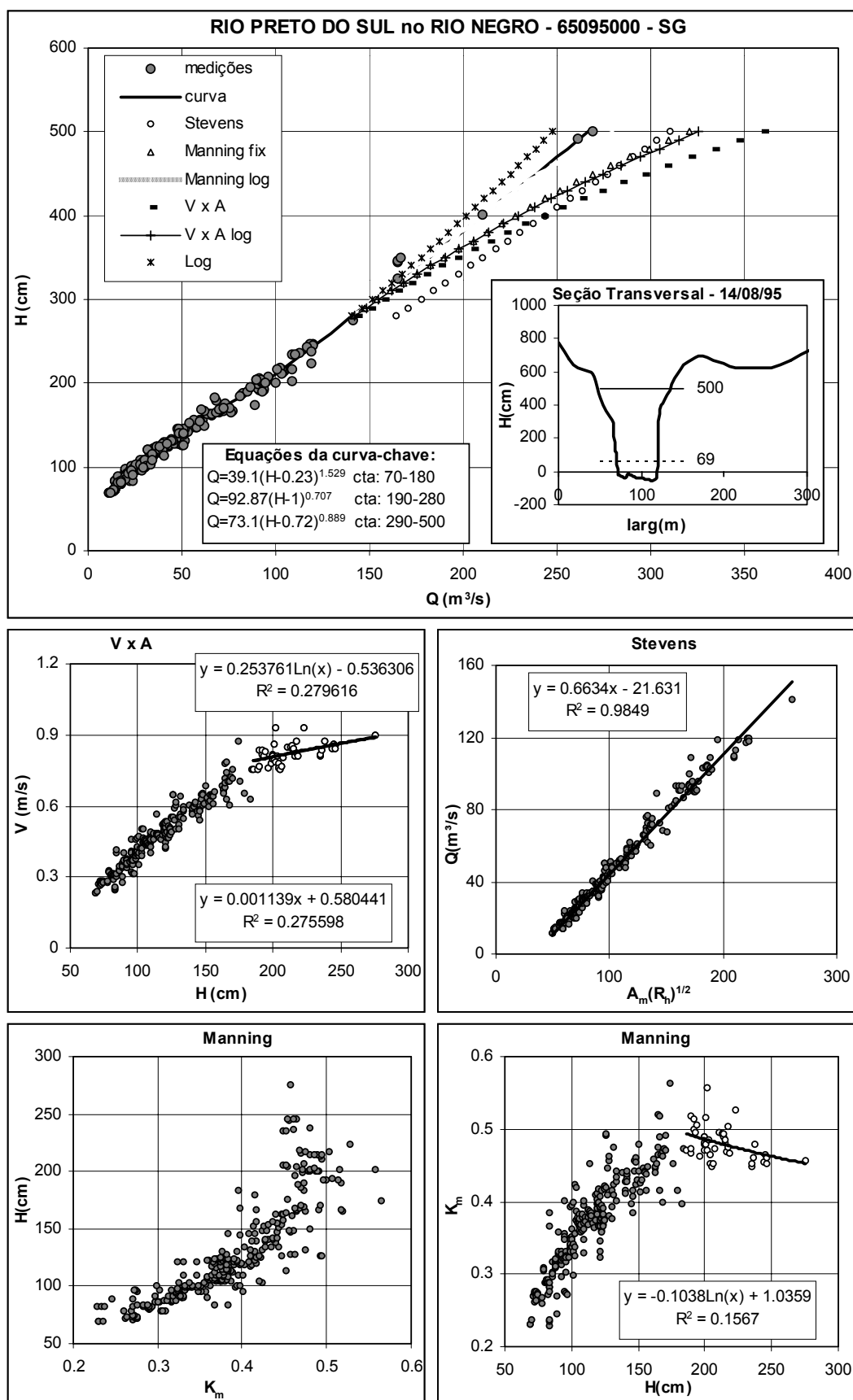


Figura D.1 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

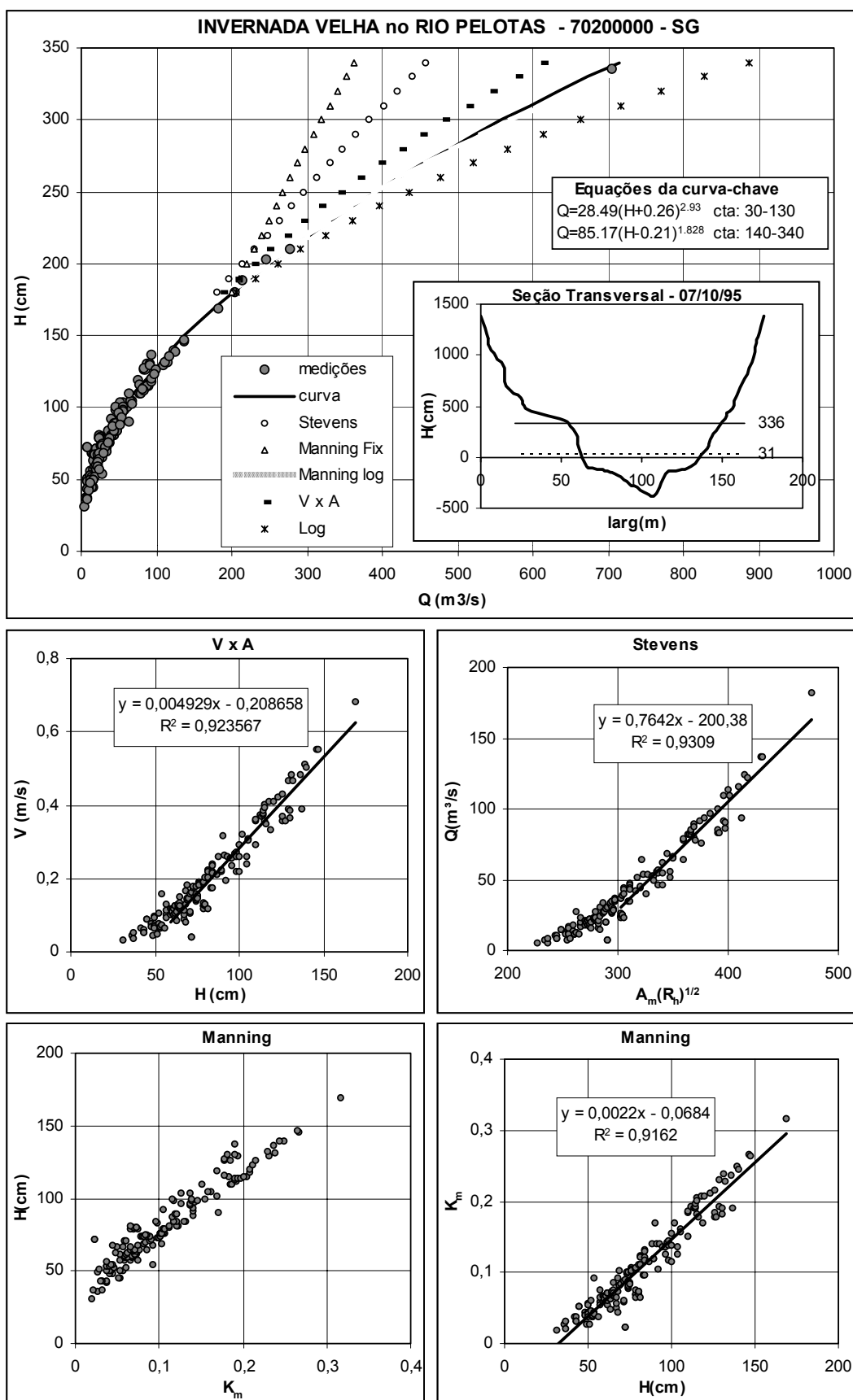


Figura D.2 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

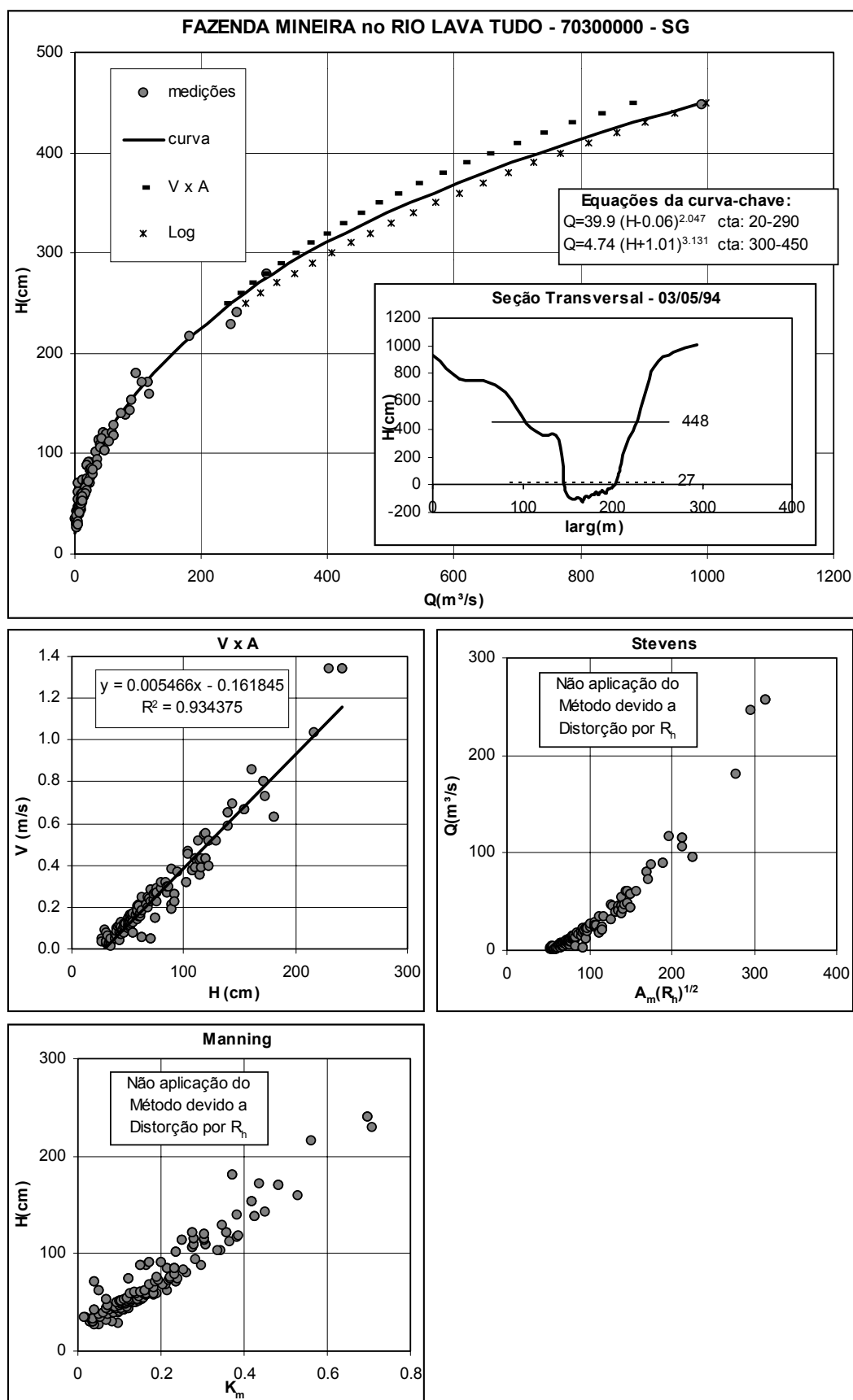


Figura D.3 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

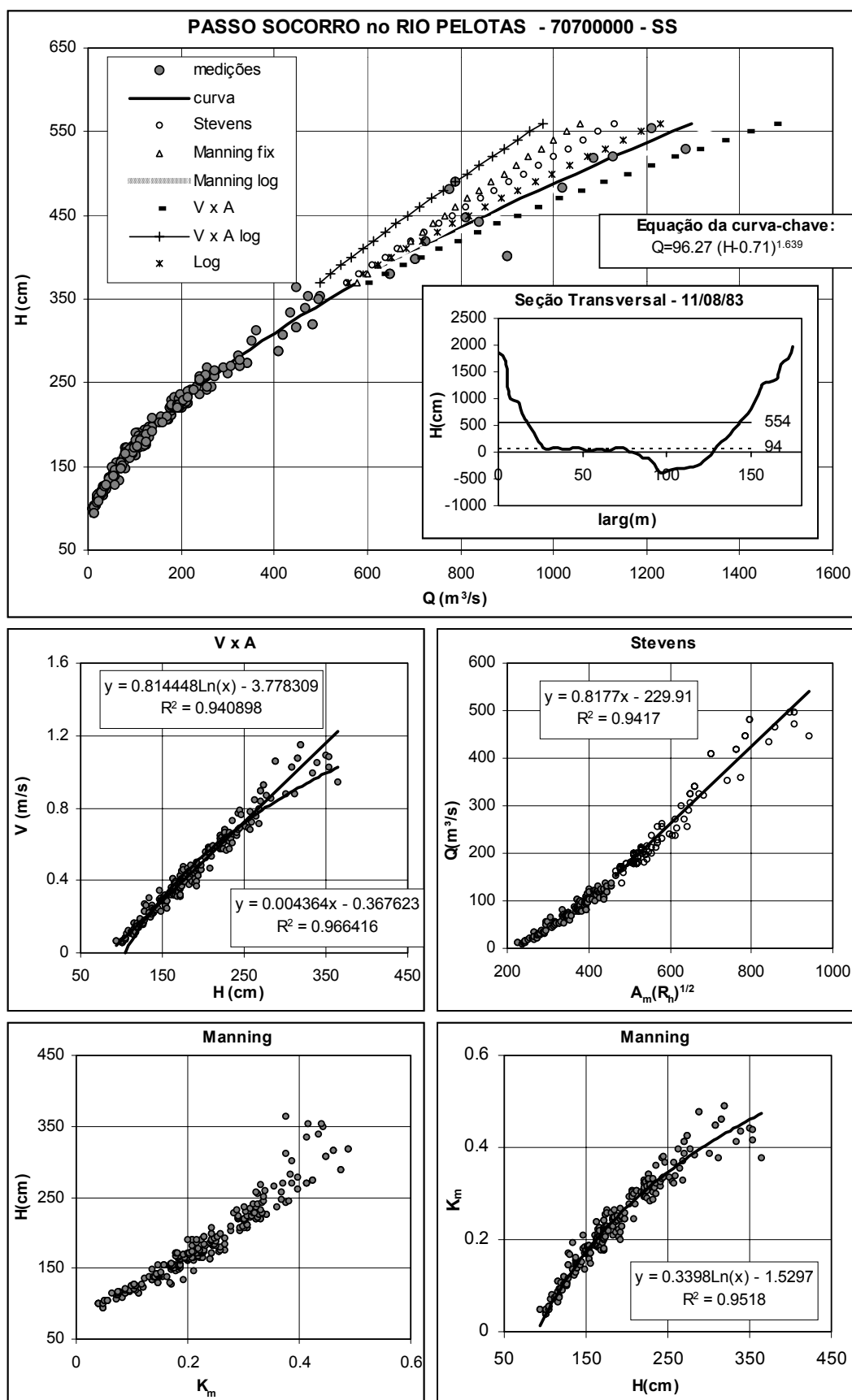


Figura D.4 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

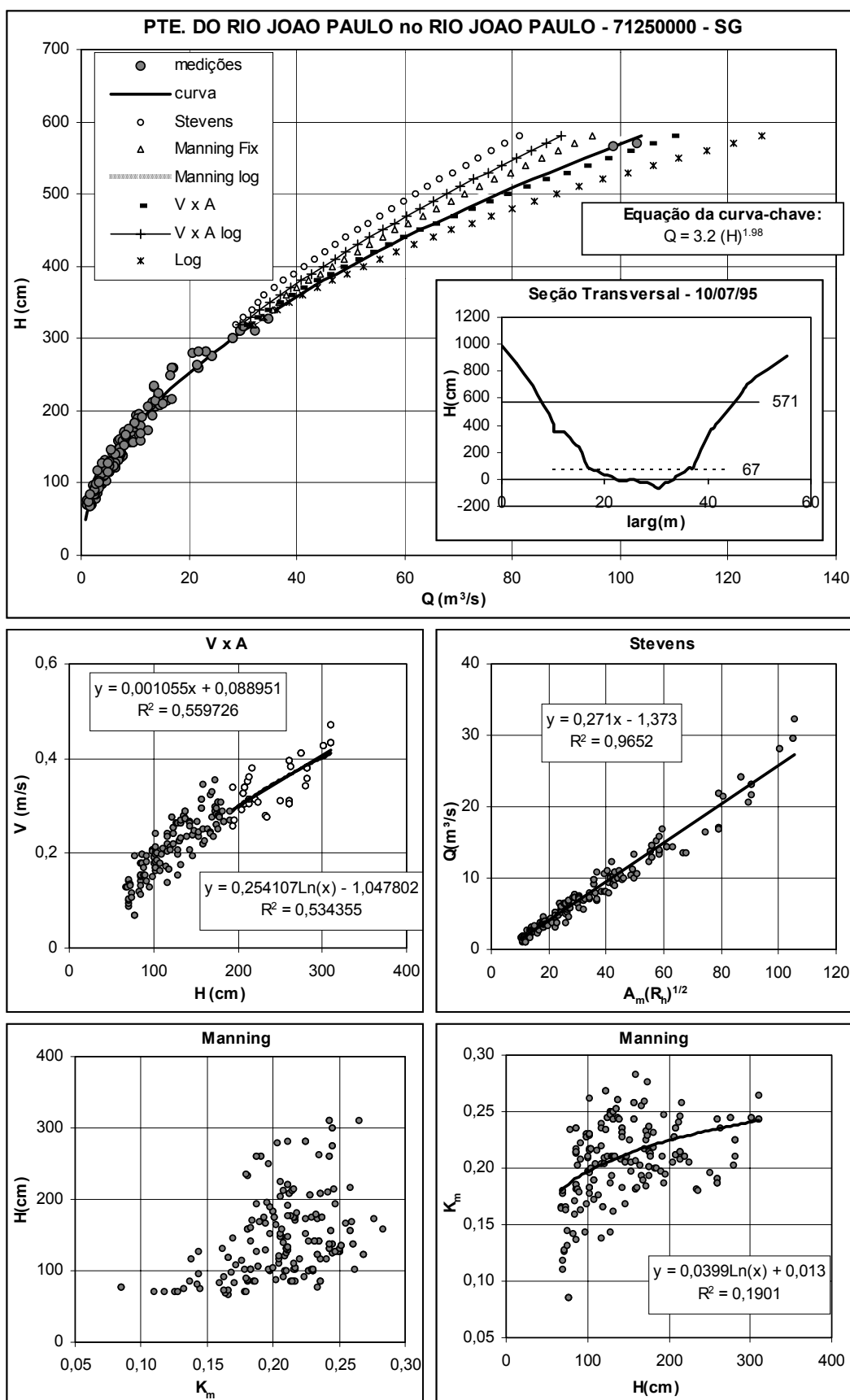


Figura D.5 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

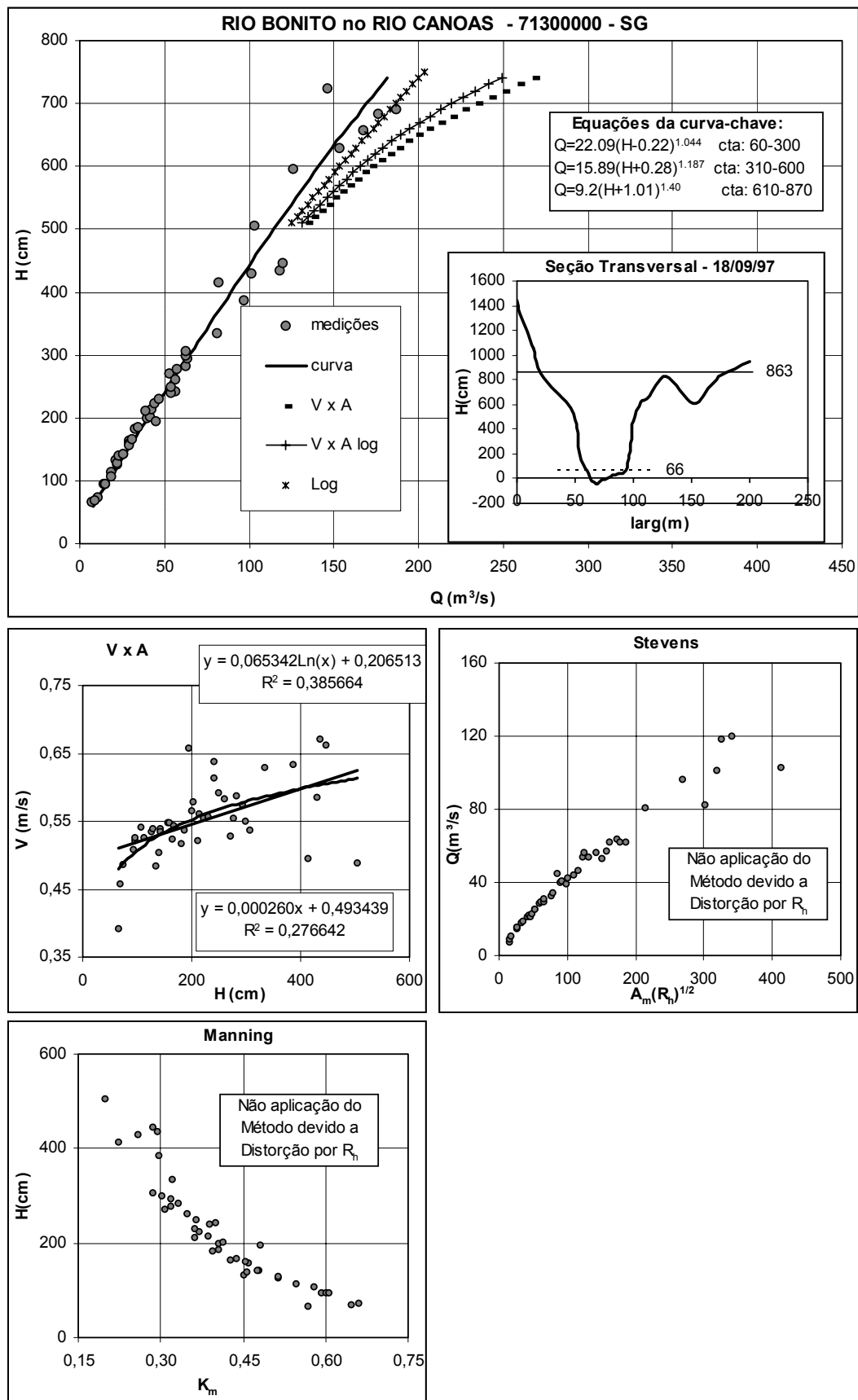


Figura D.6 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

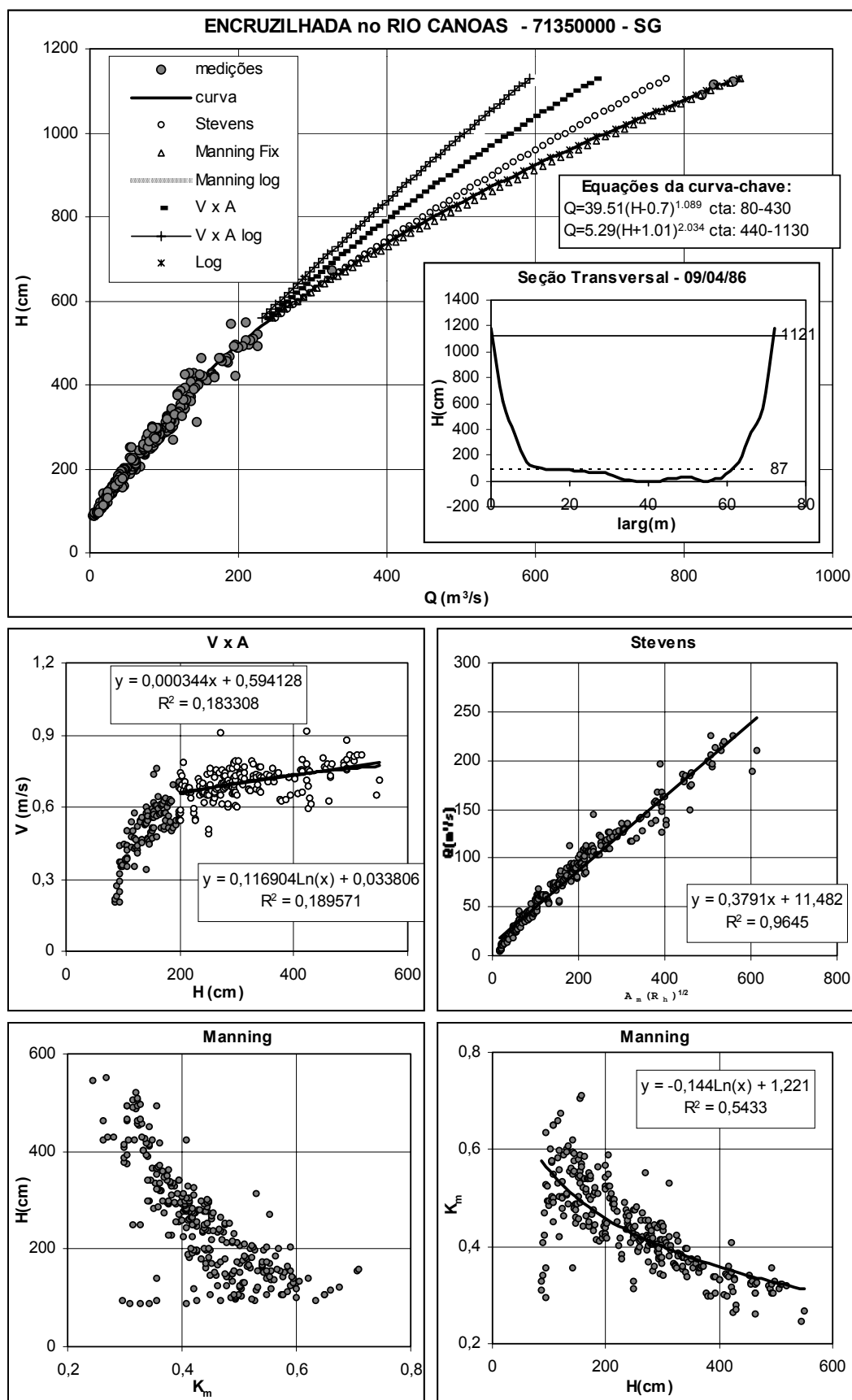


Figura D.7 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

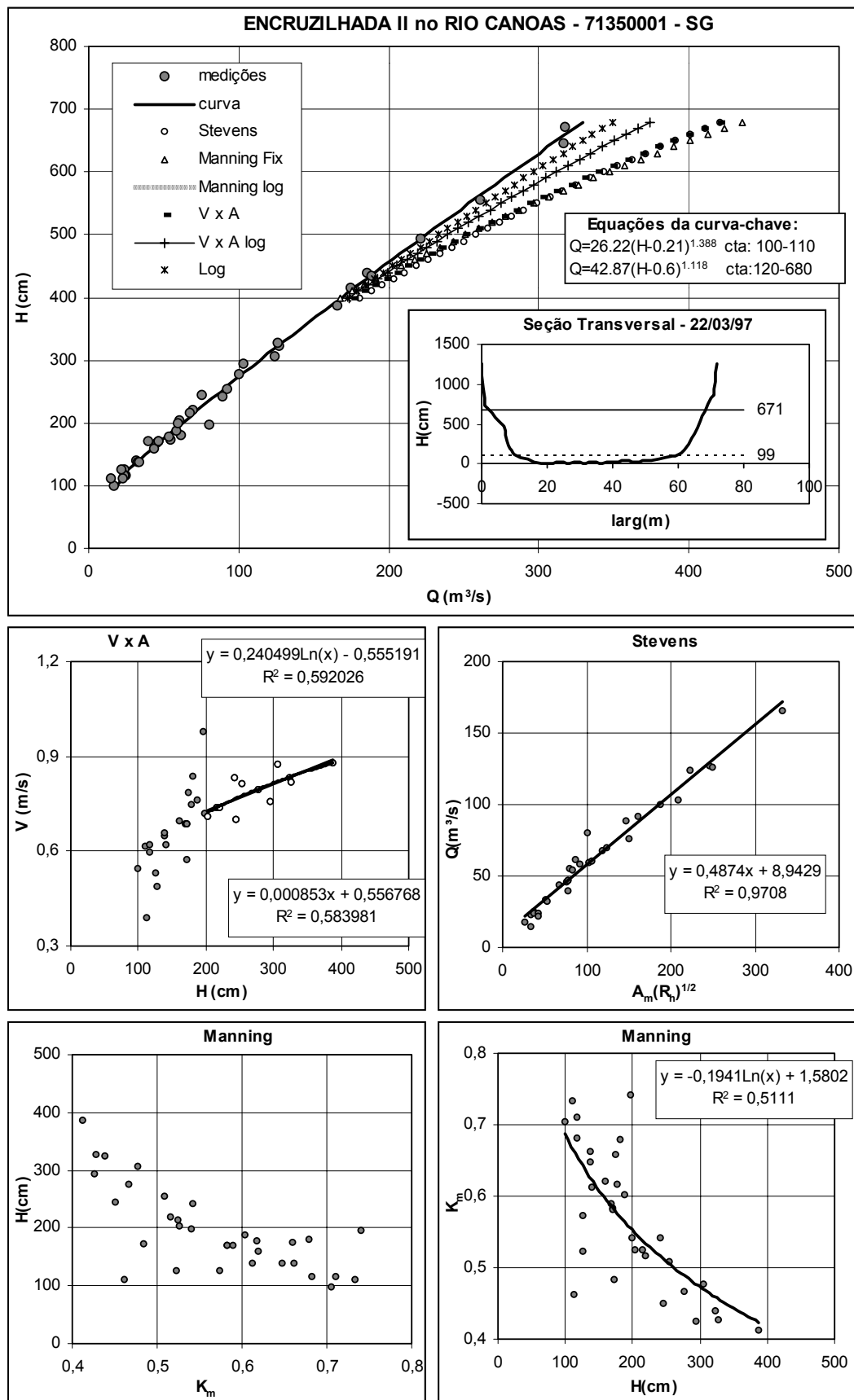


Figura D.8 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

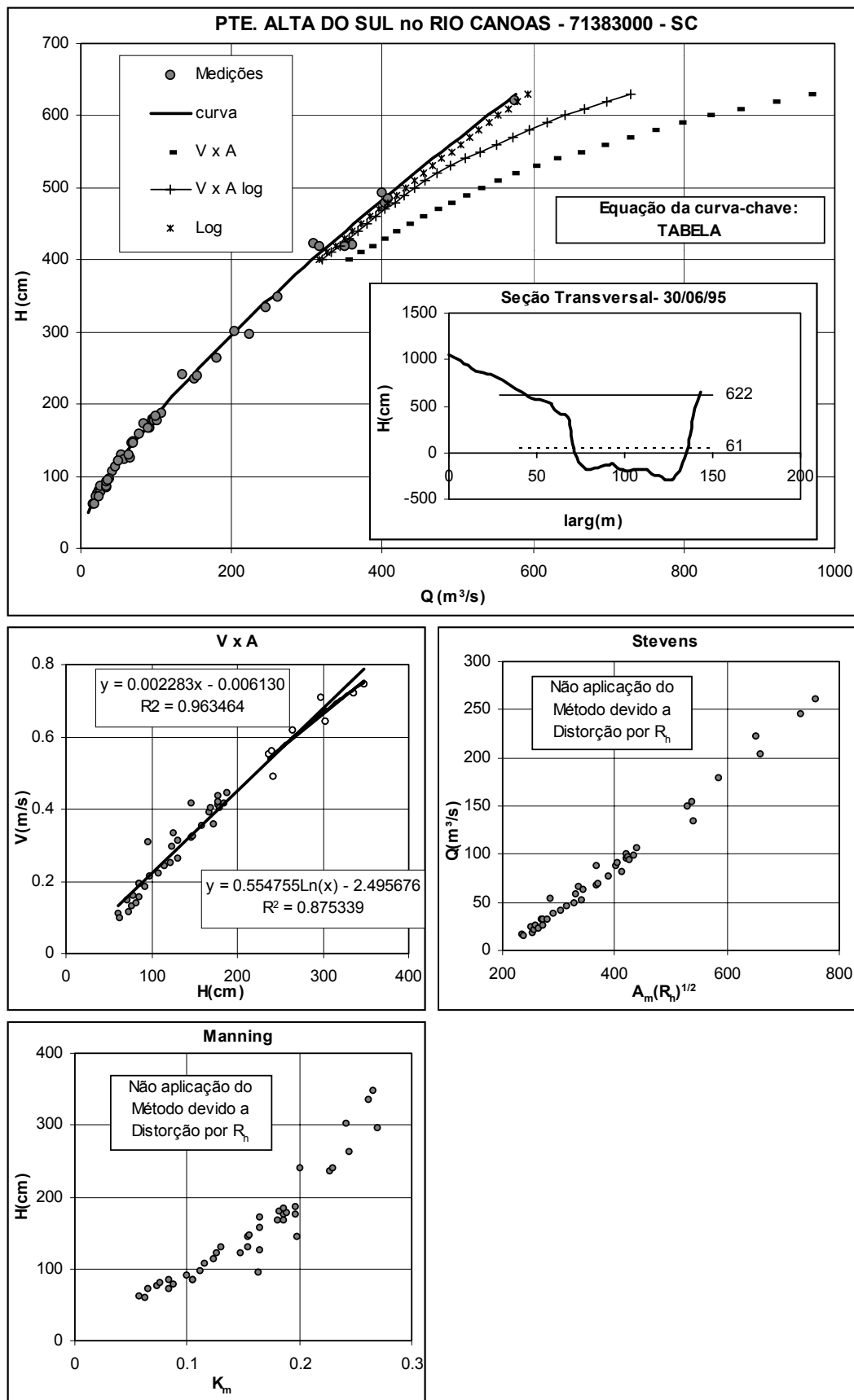
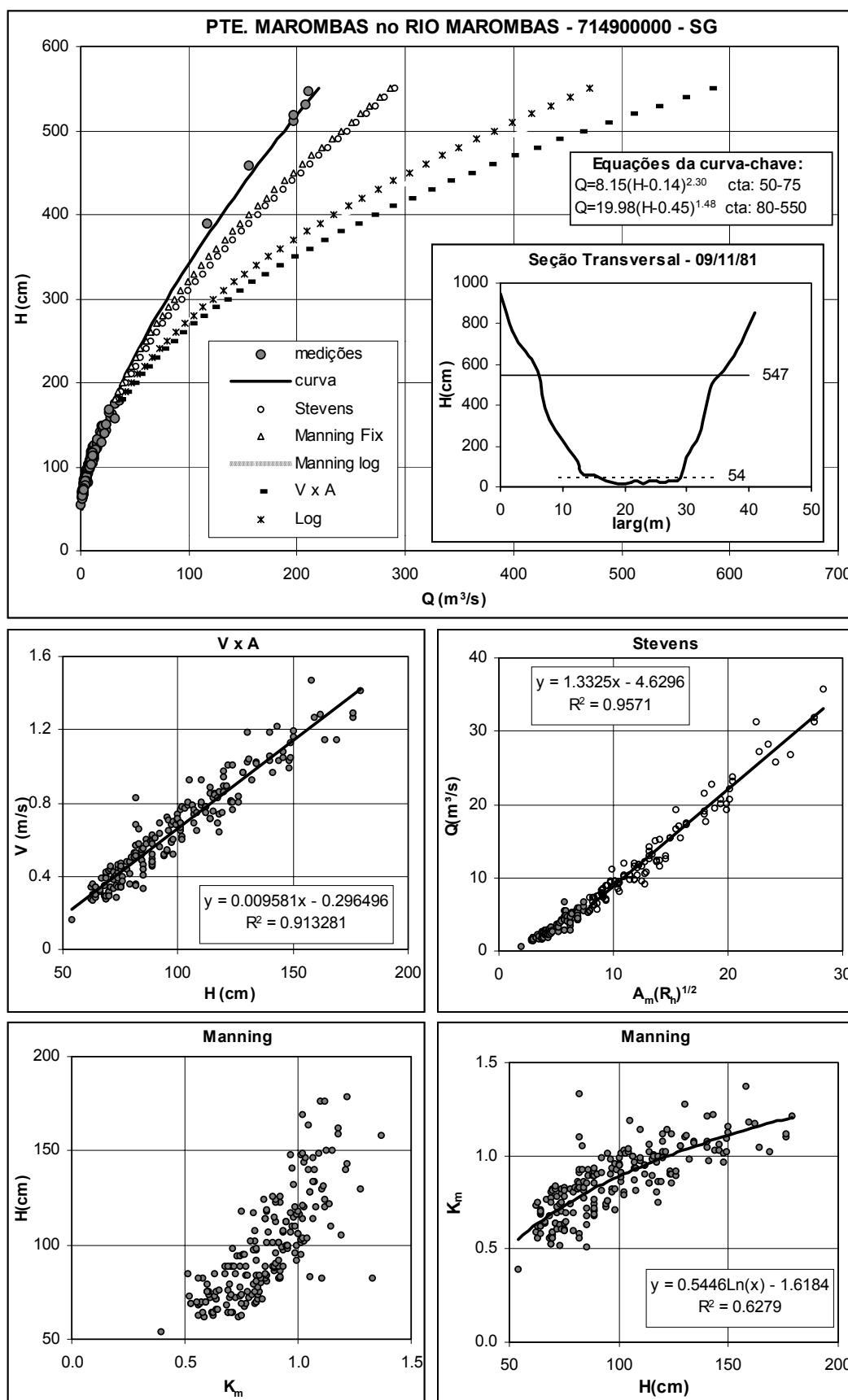


Figura D.9 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.



Fix

Figura D.10 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

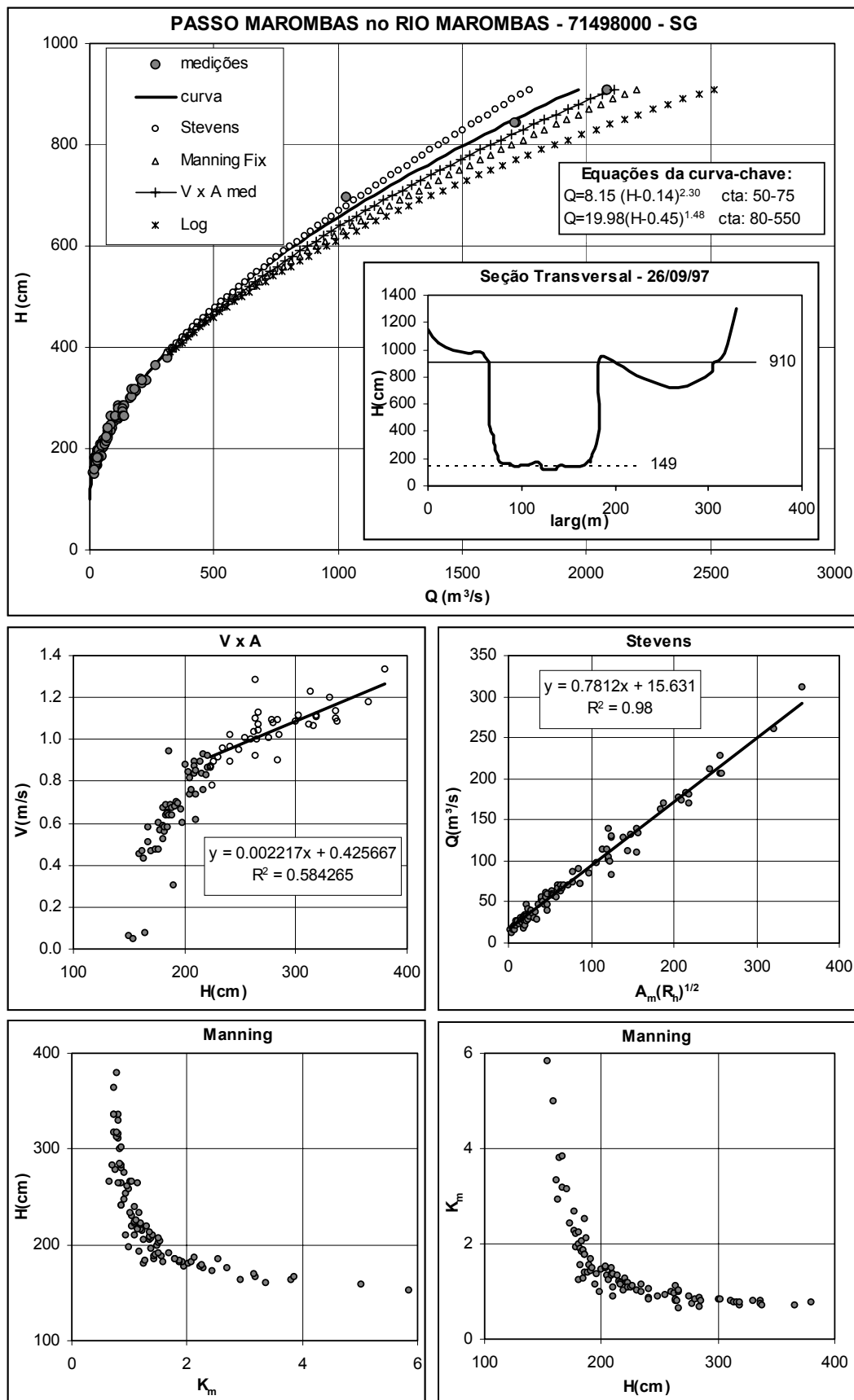


Figura D.11 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

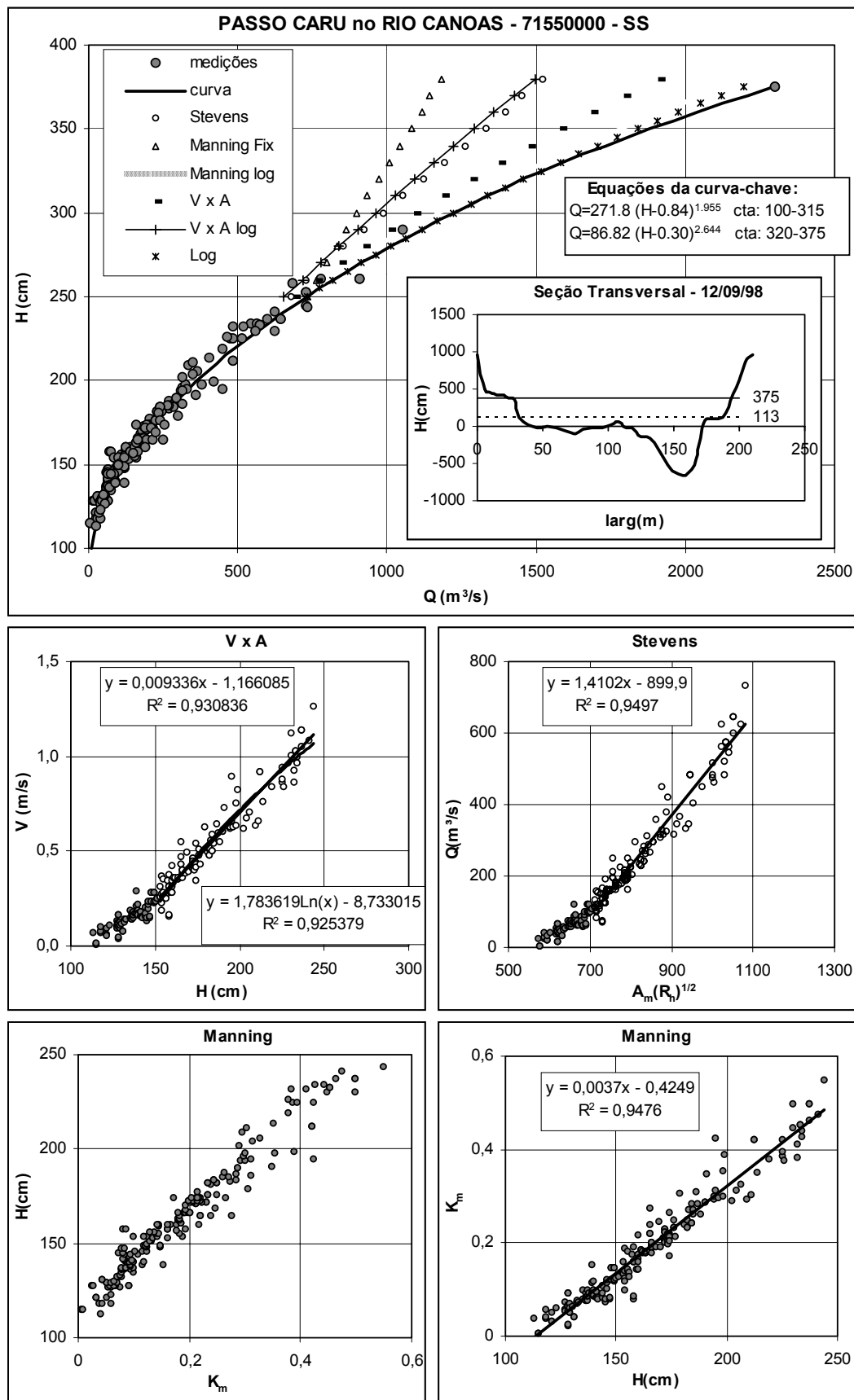


Figura D.12 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

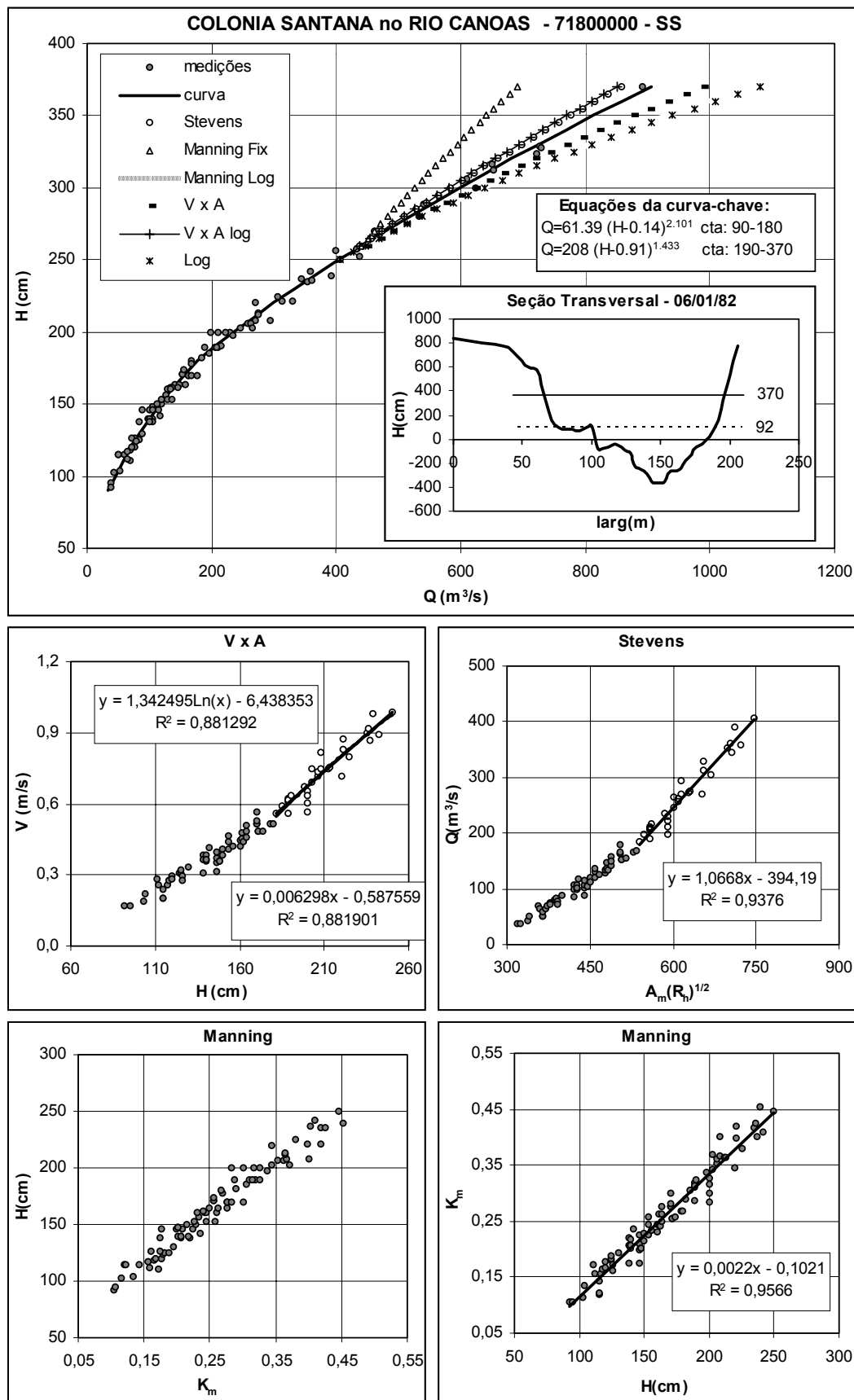


Figura D.13 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

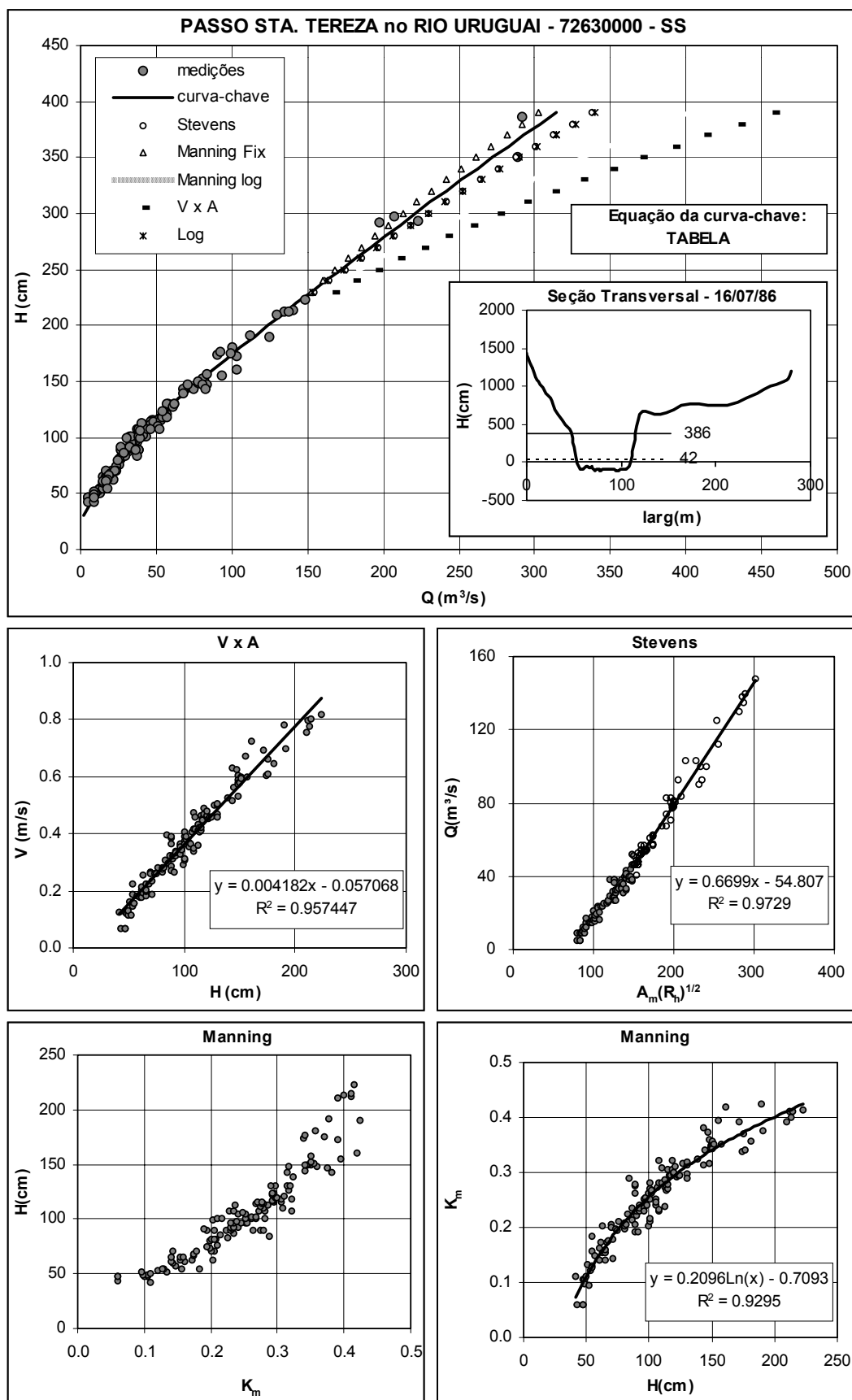


Figura D.14 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

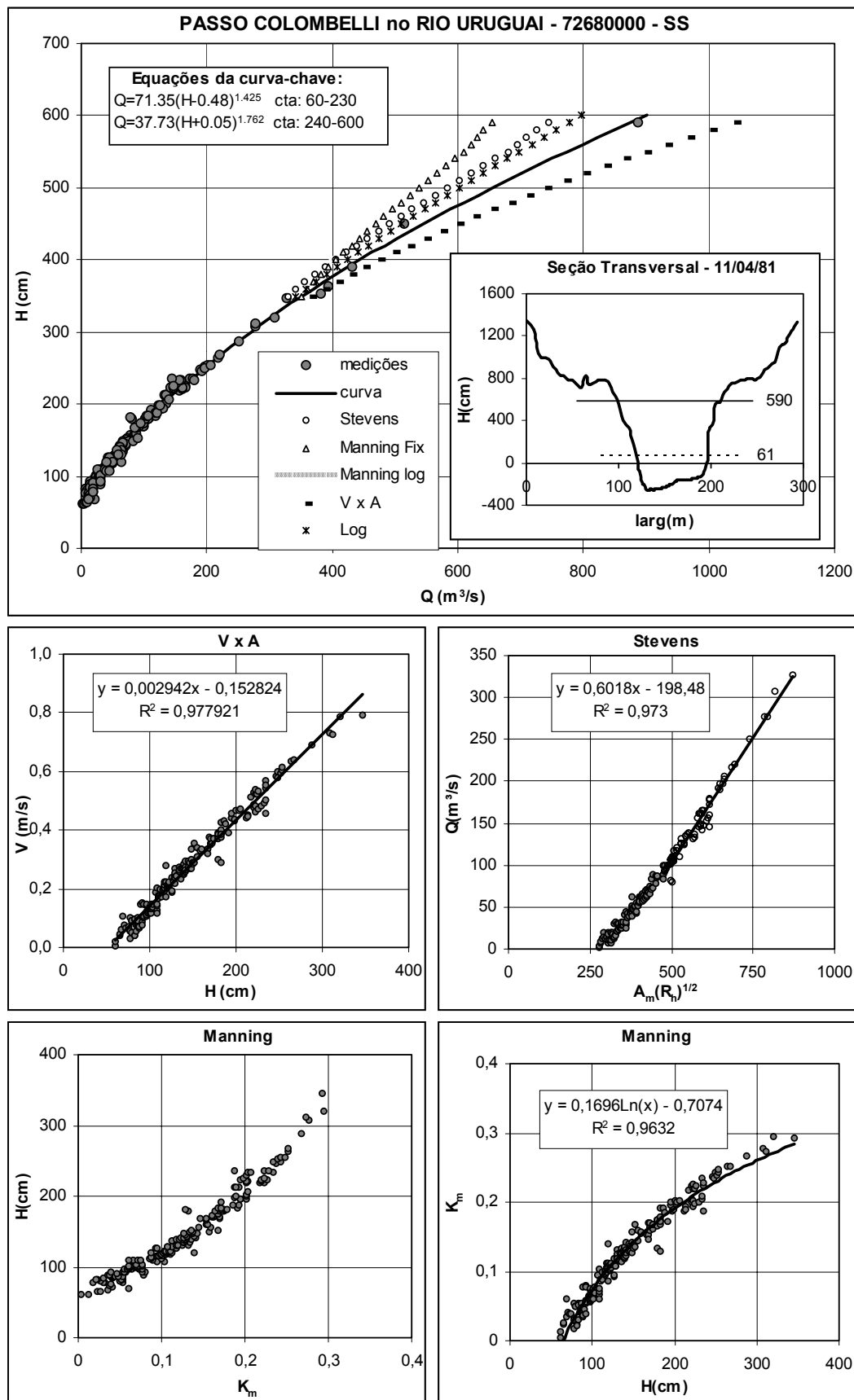


Figura D.15 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

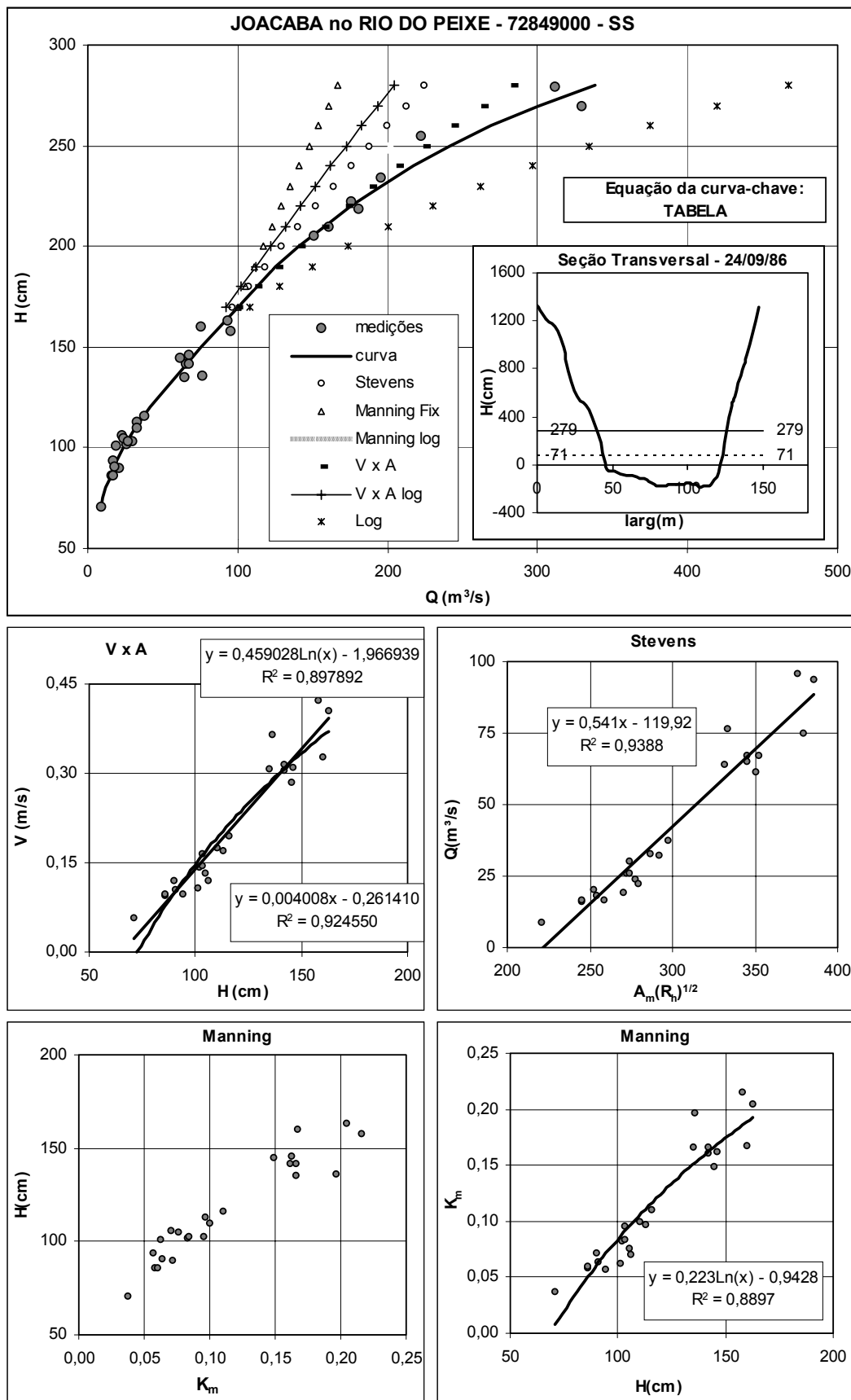


Figura D.16 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

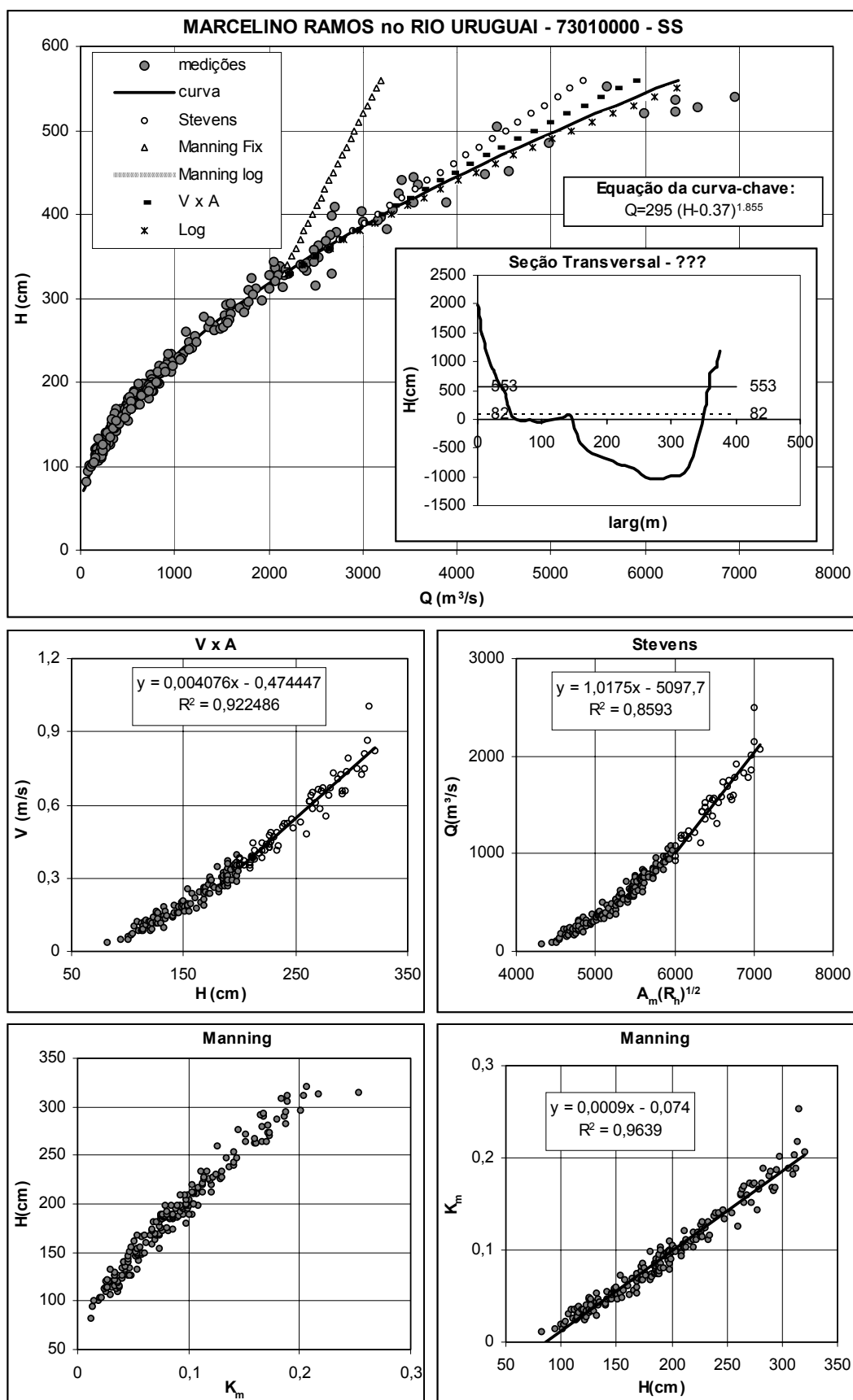


Figura D.17 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

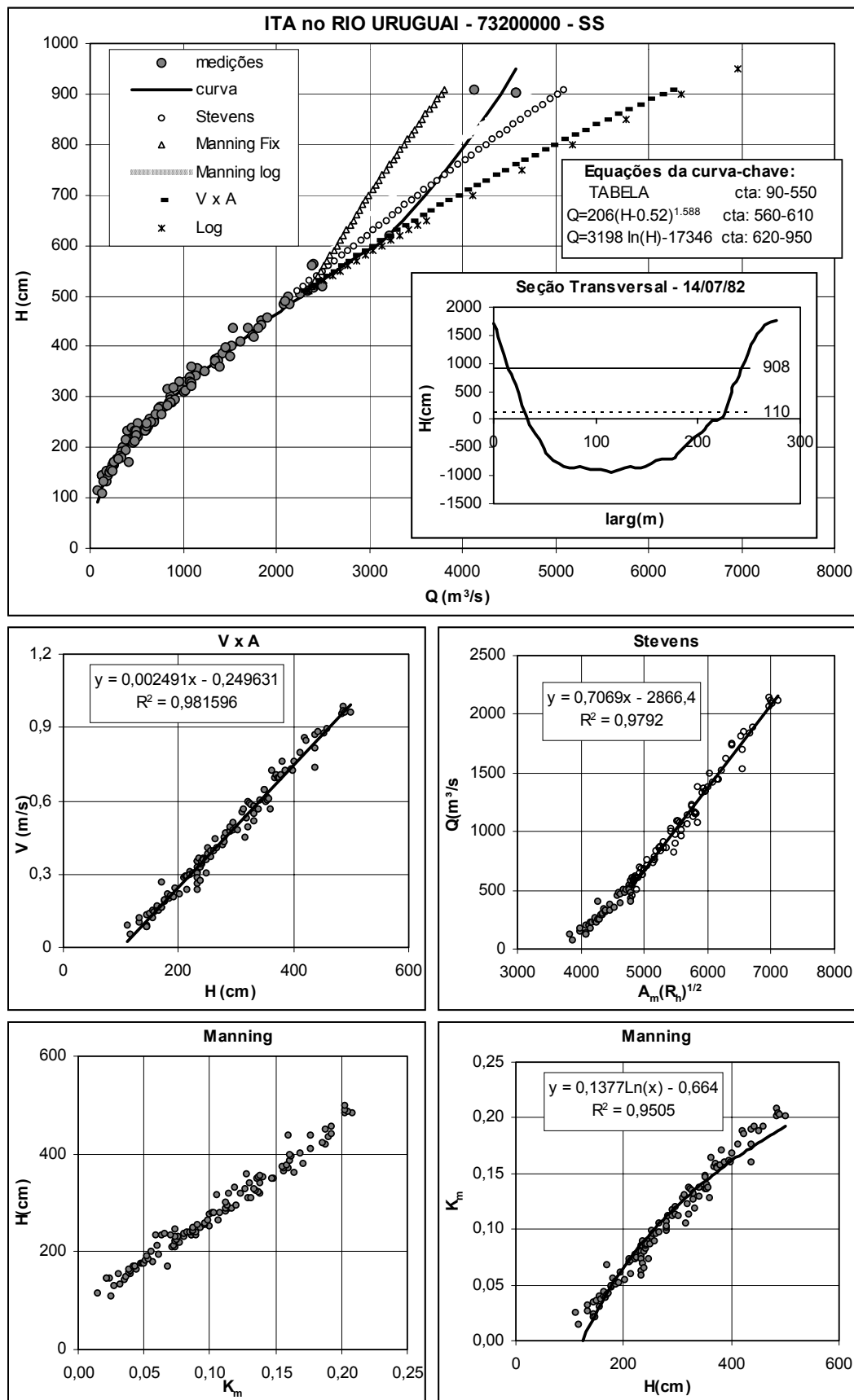


Figura D.18 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

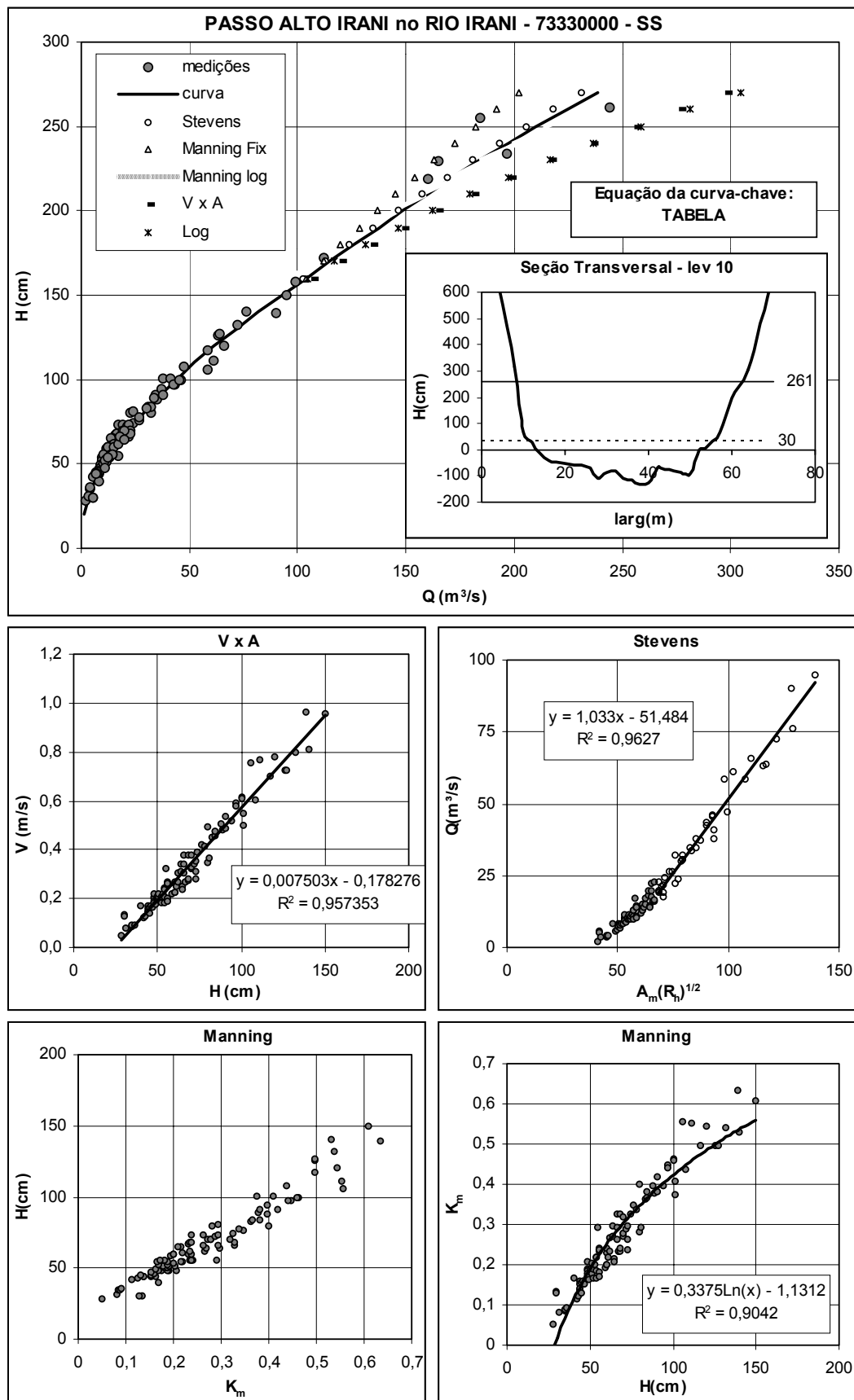


Figura D.19 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

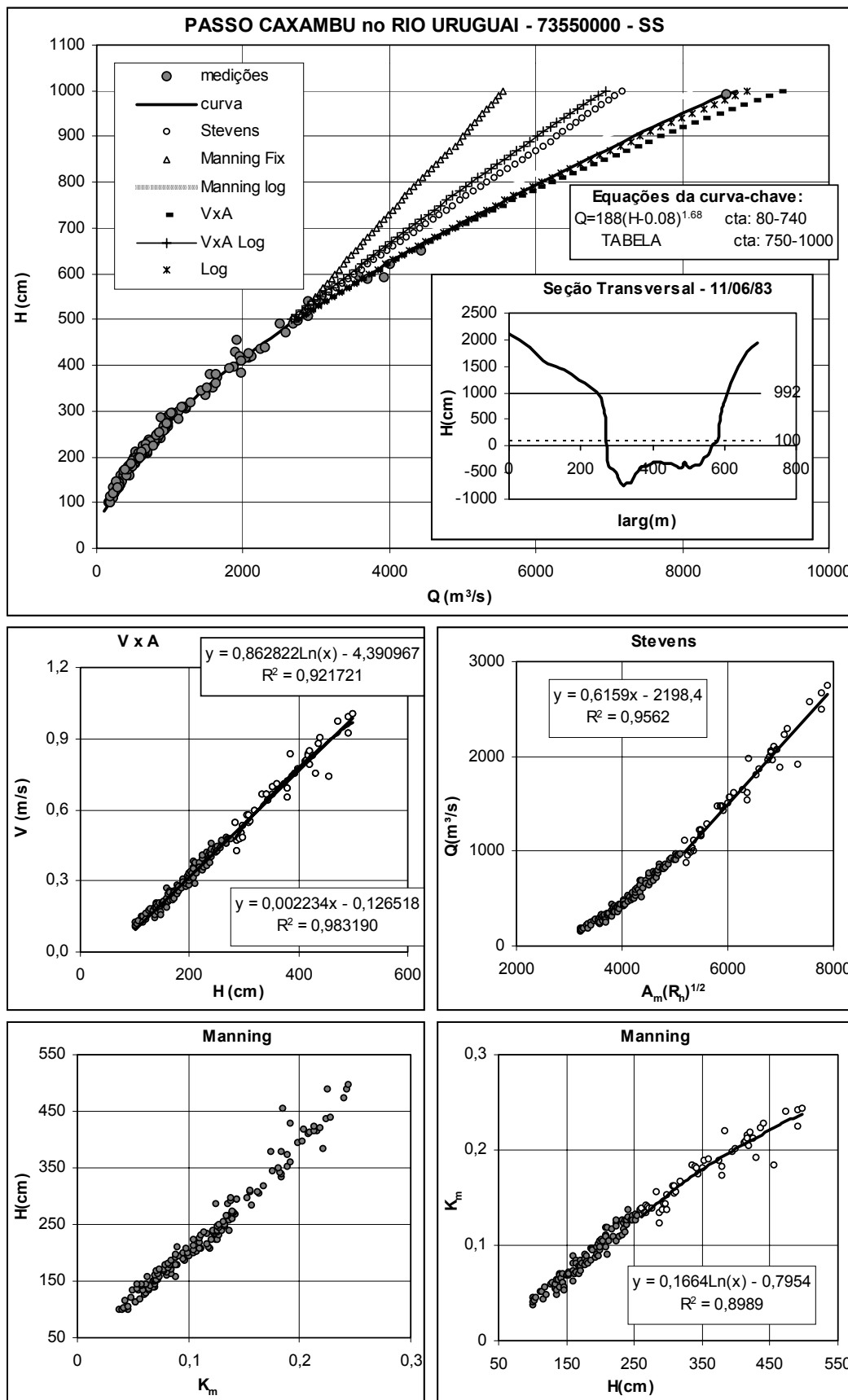


Figura D.20 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

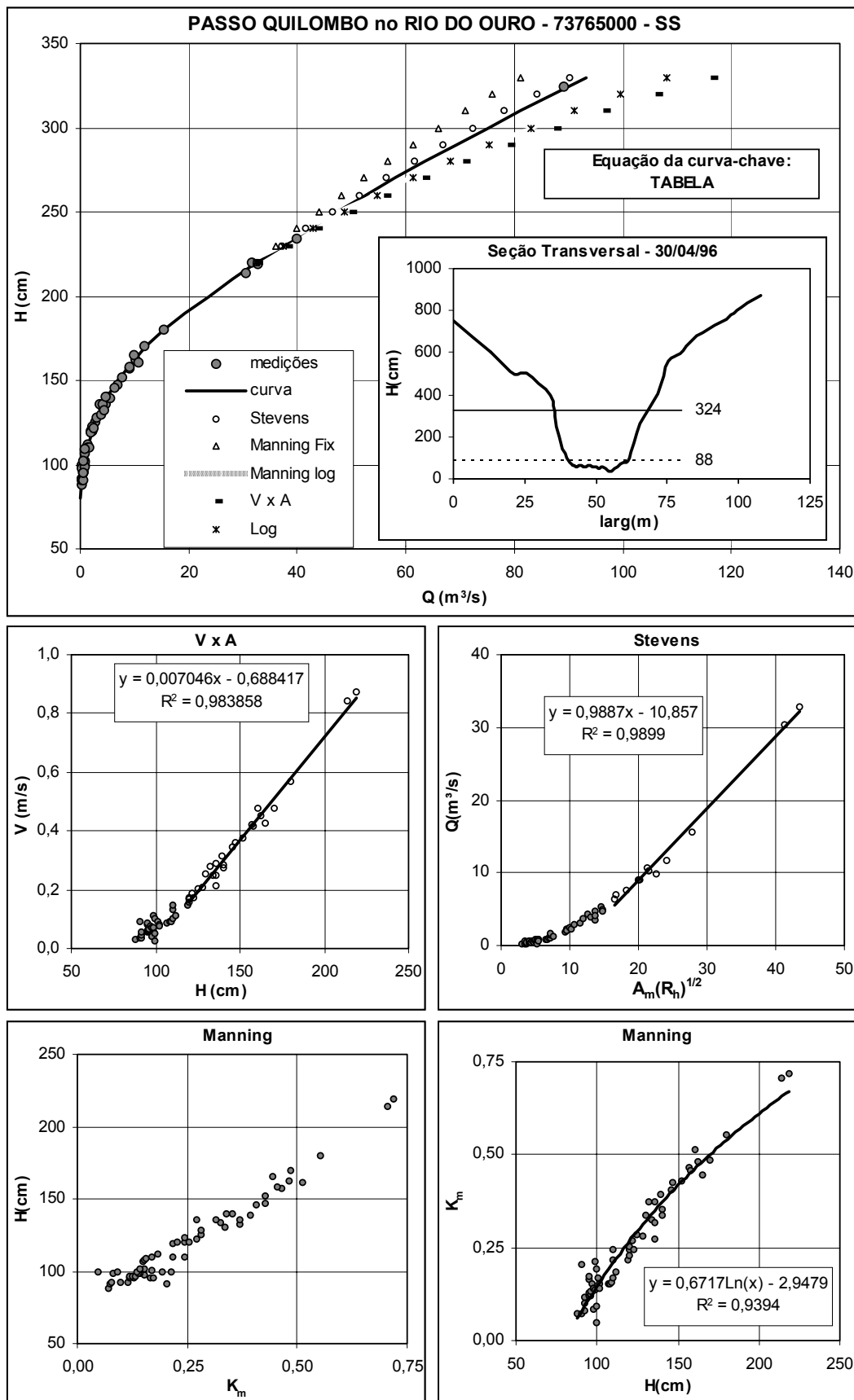


Figura D.21 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

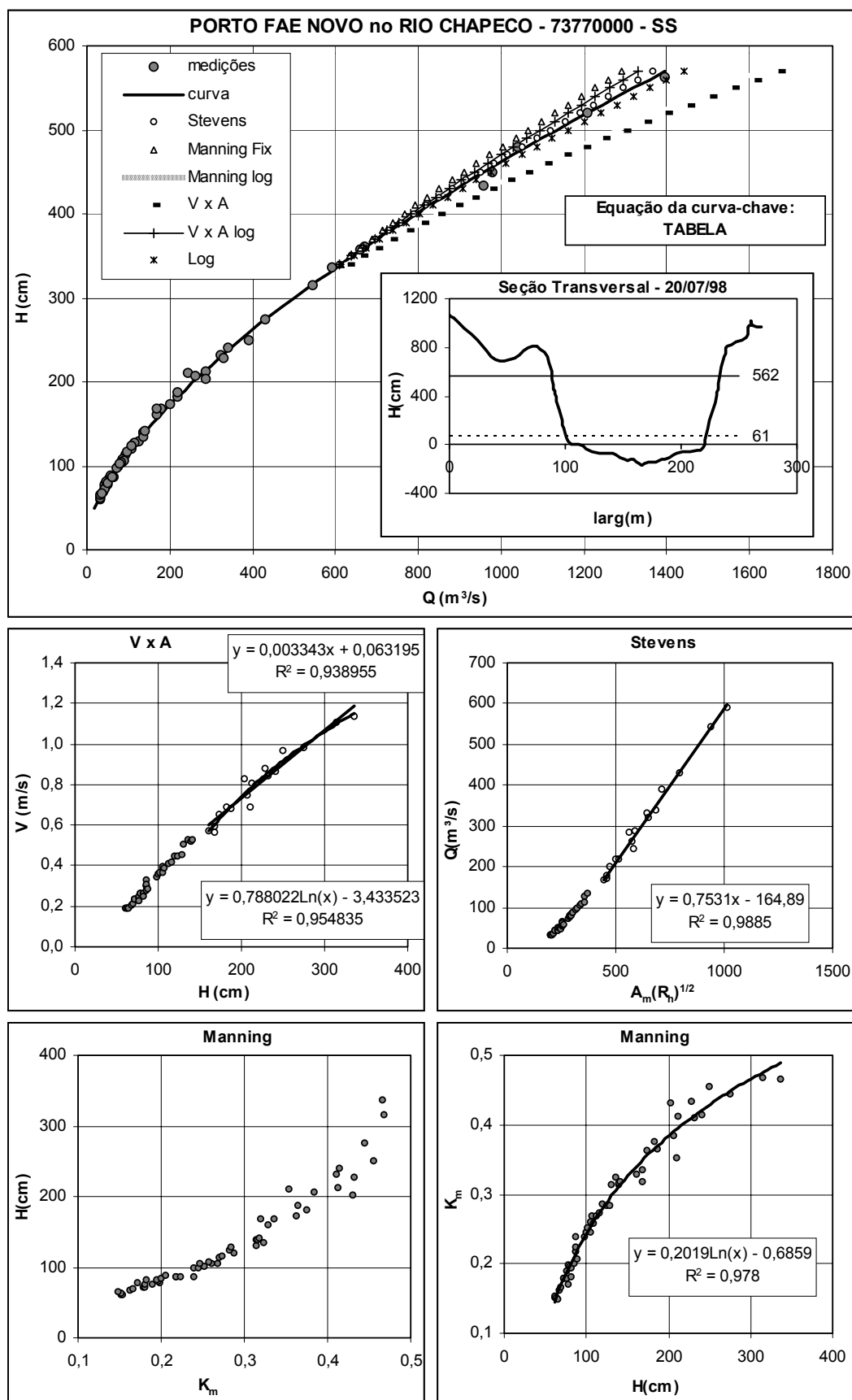


figura D.22 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

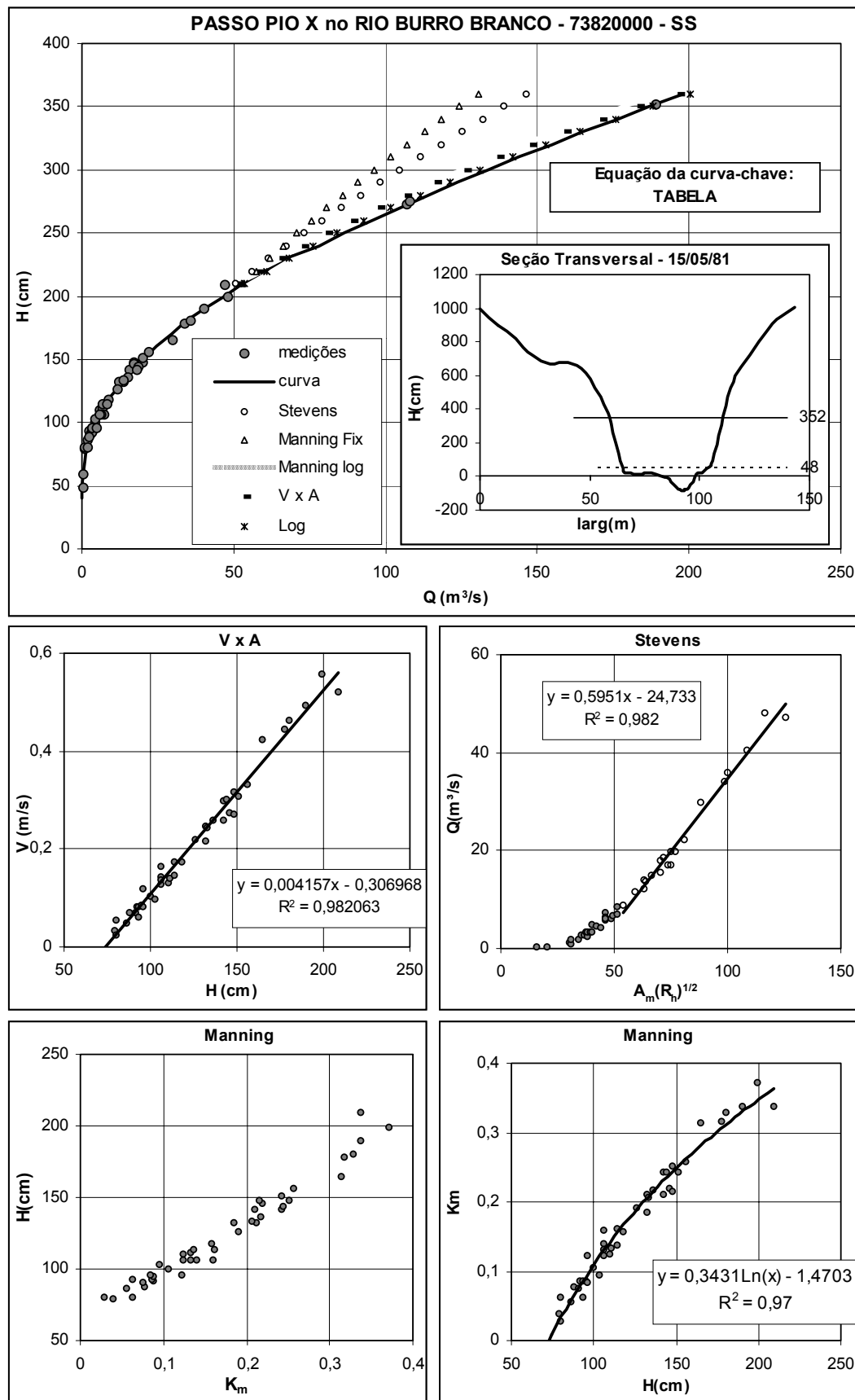


Figura D.23 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

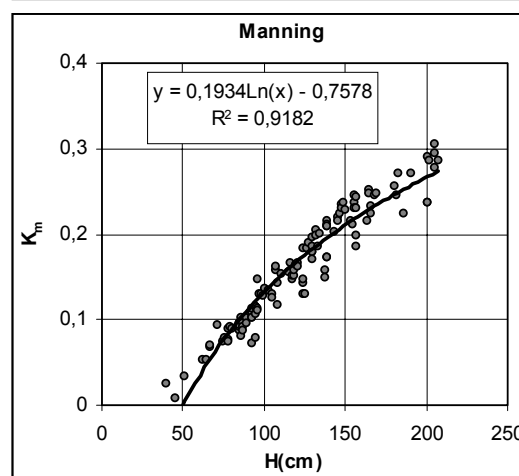
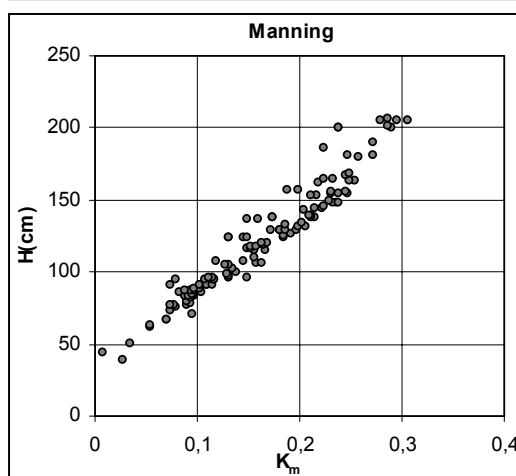
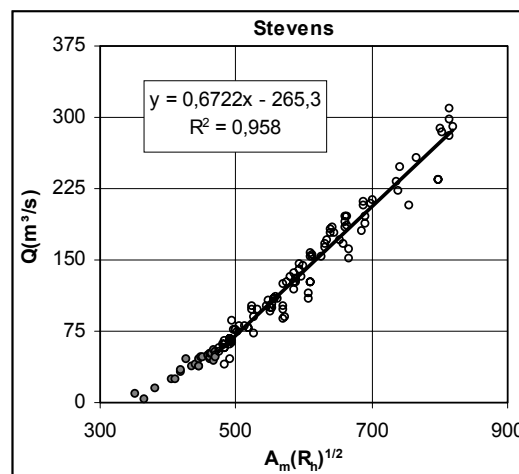
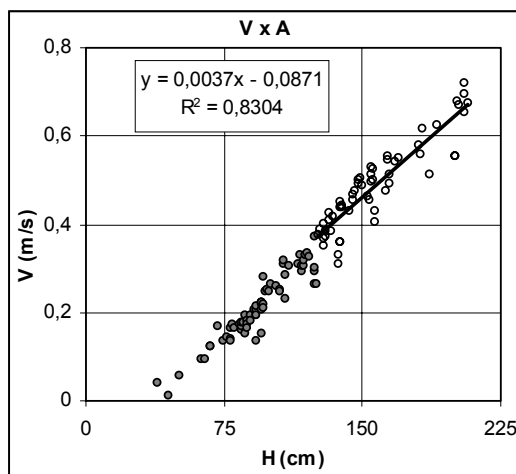
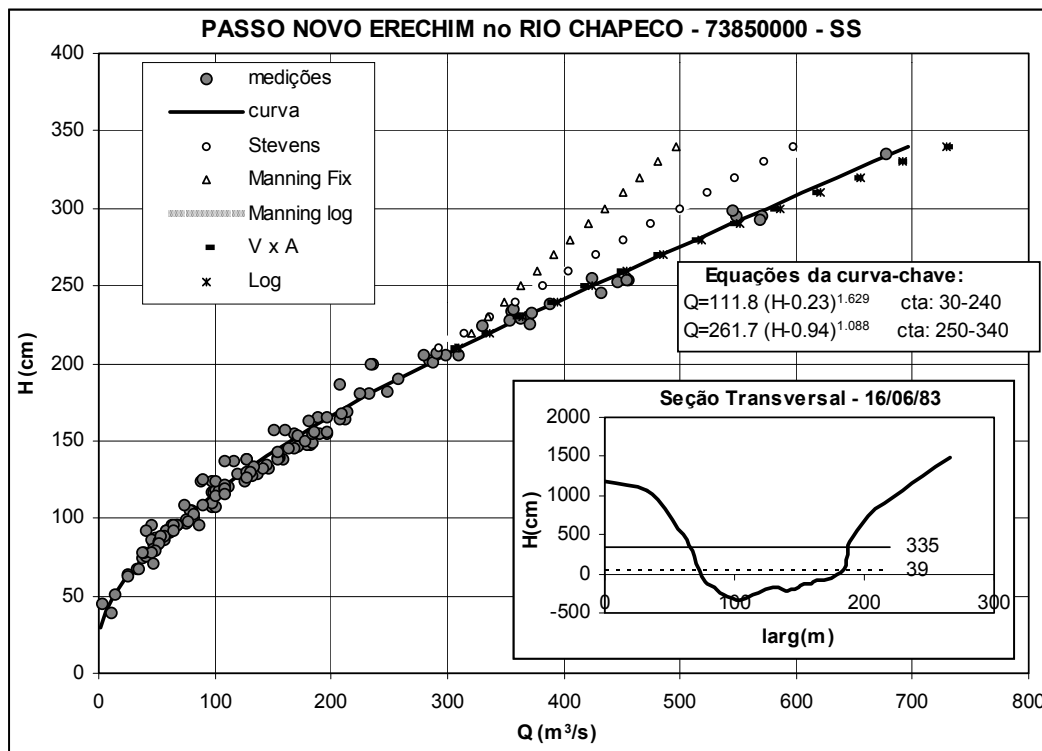


Figura D.24 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

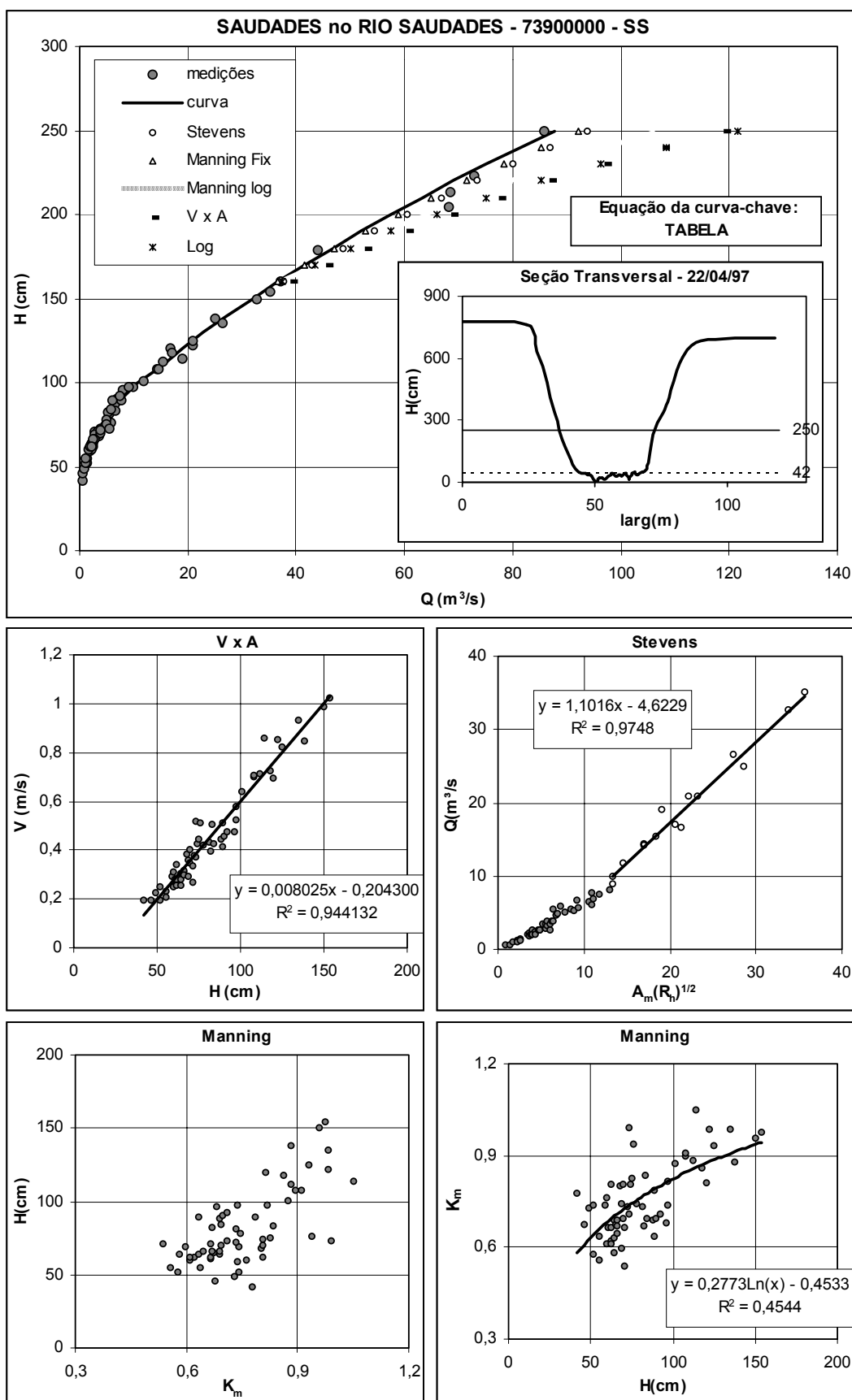


Figura D.25 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

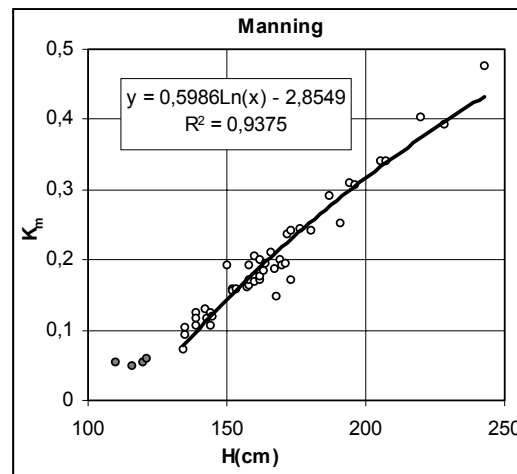
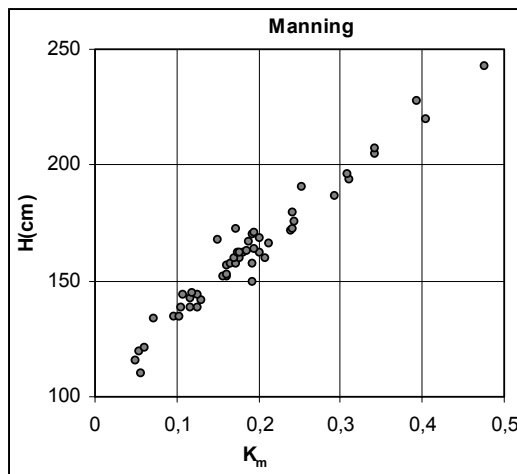
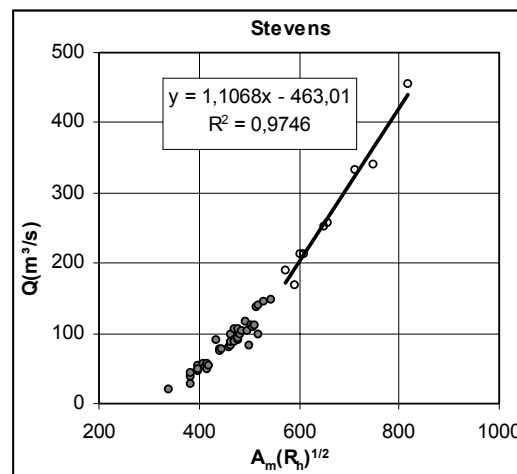
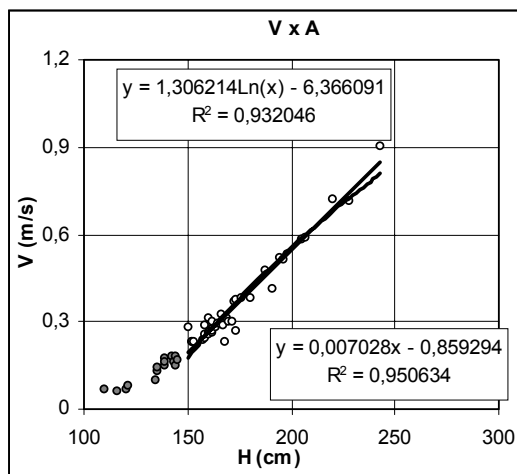
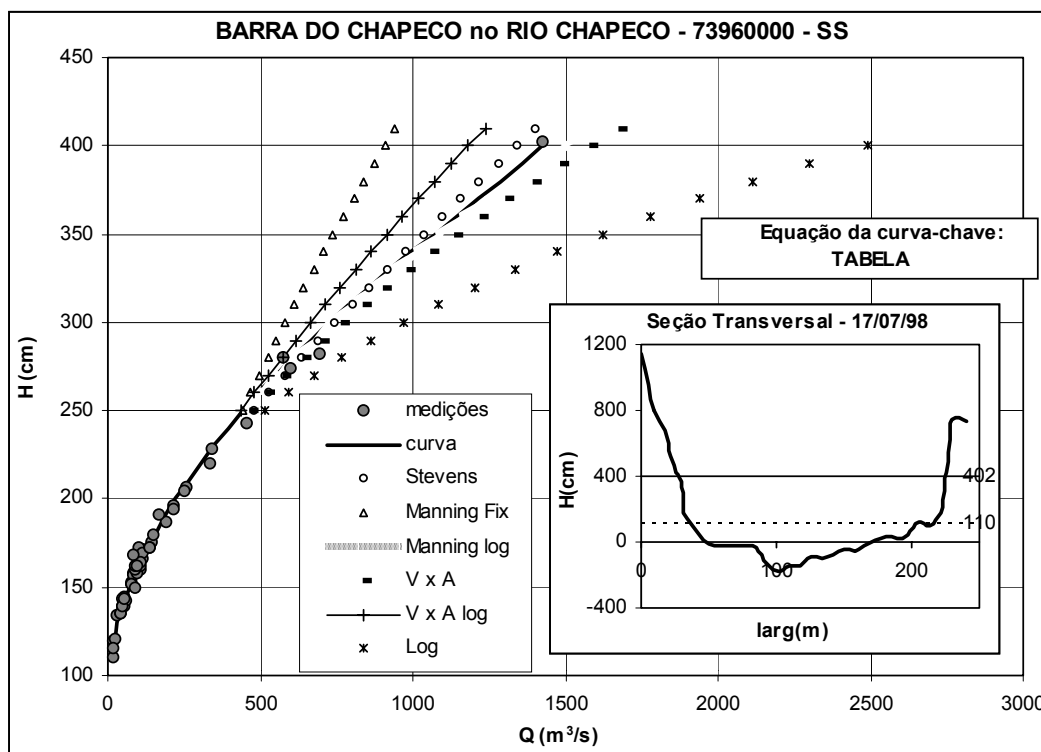


Figura D.26 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

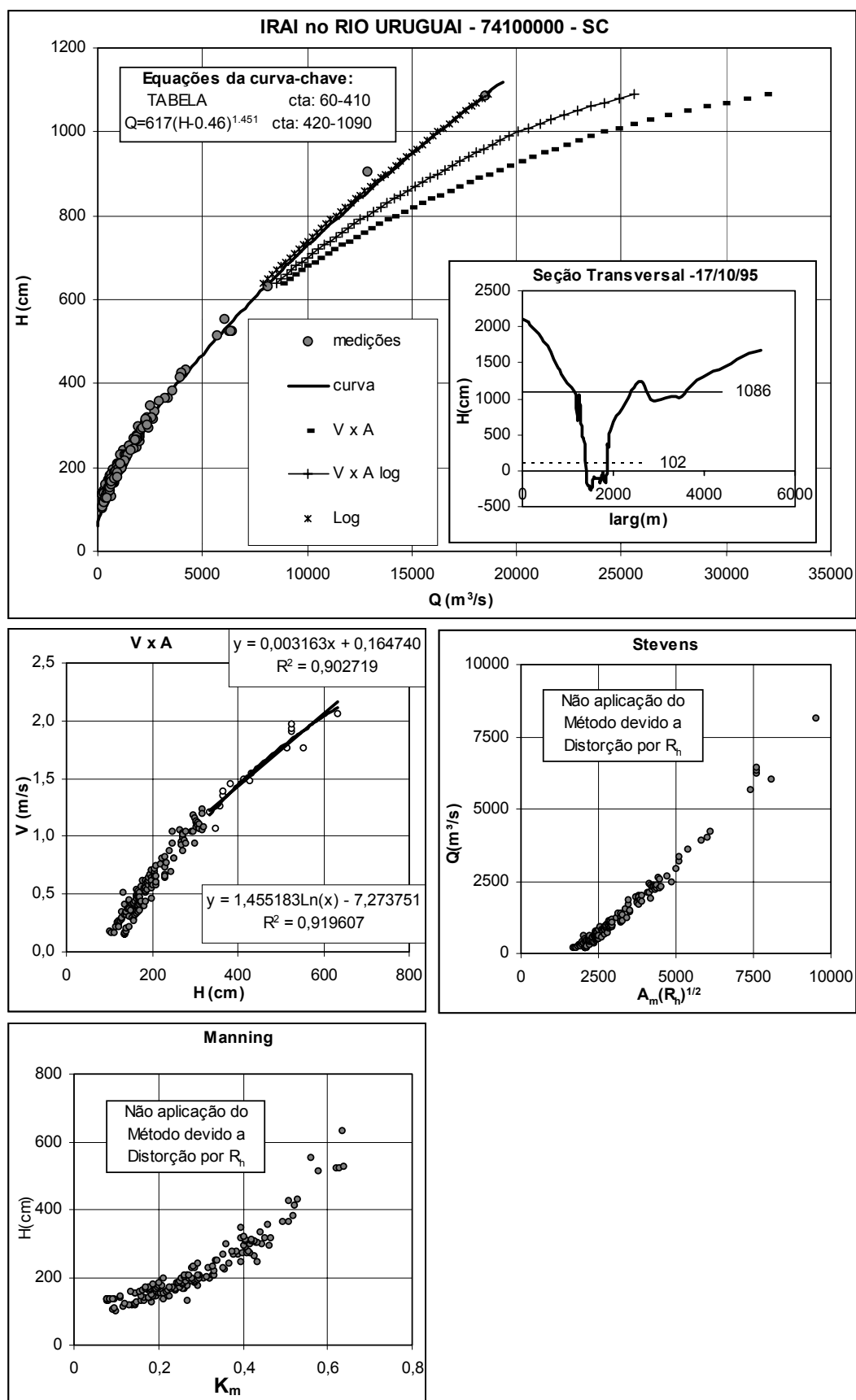


Figura D.27 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

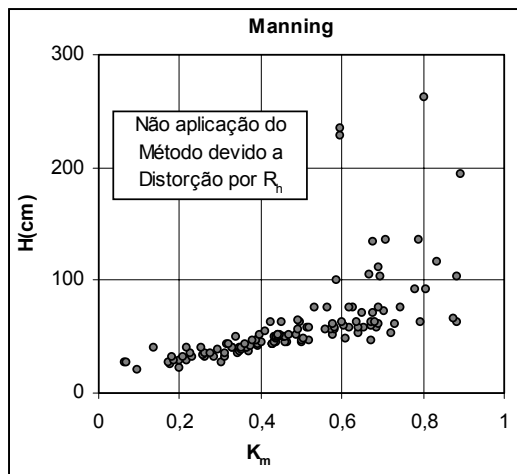
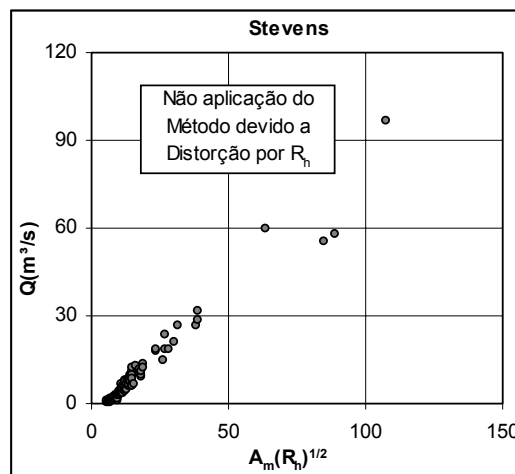
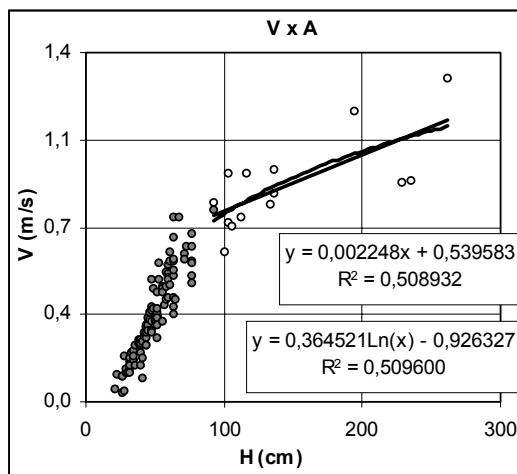
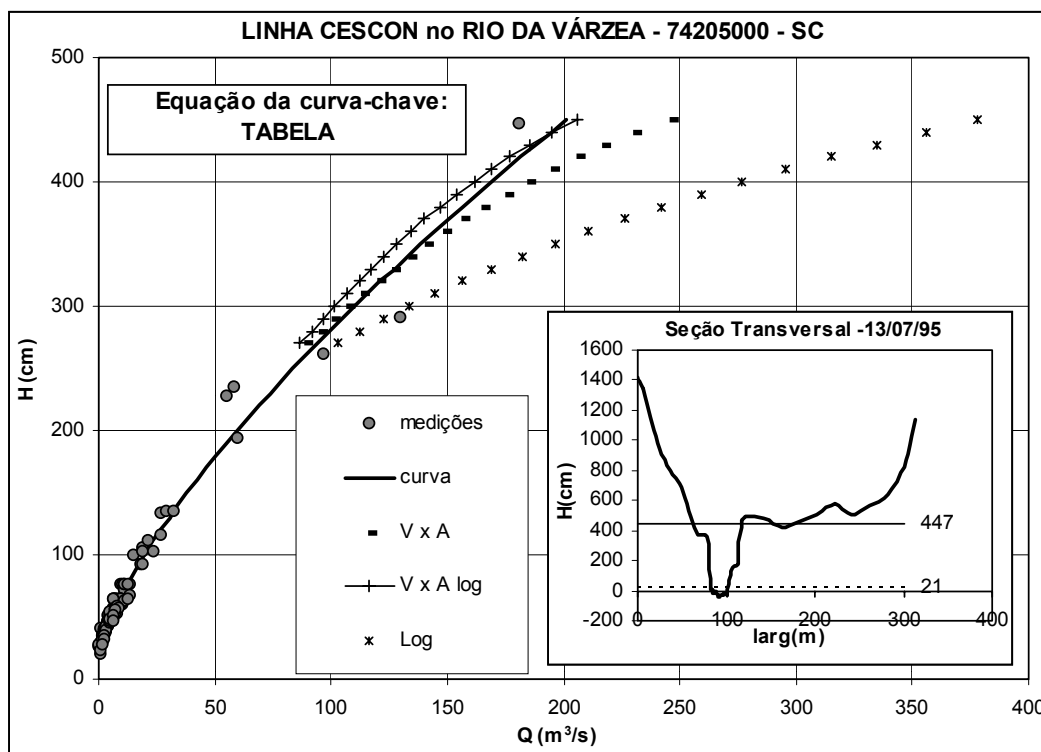


Figura D.28 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

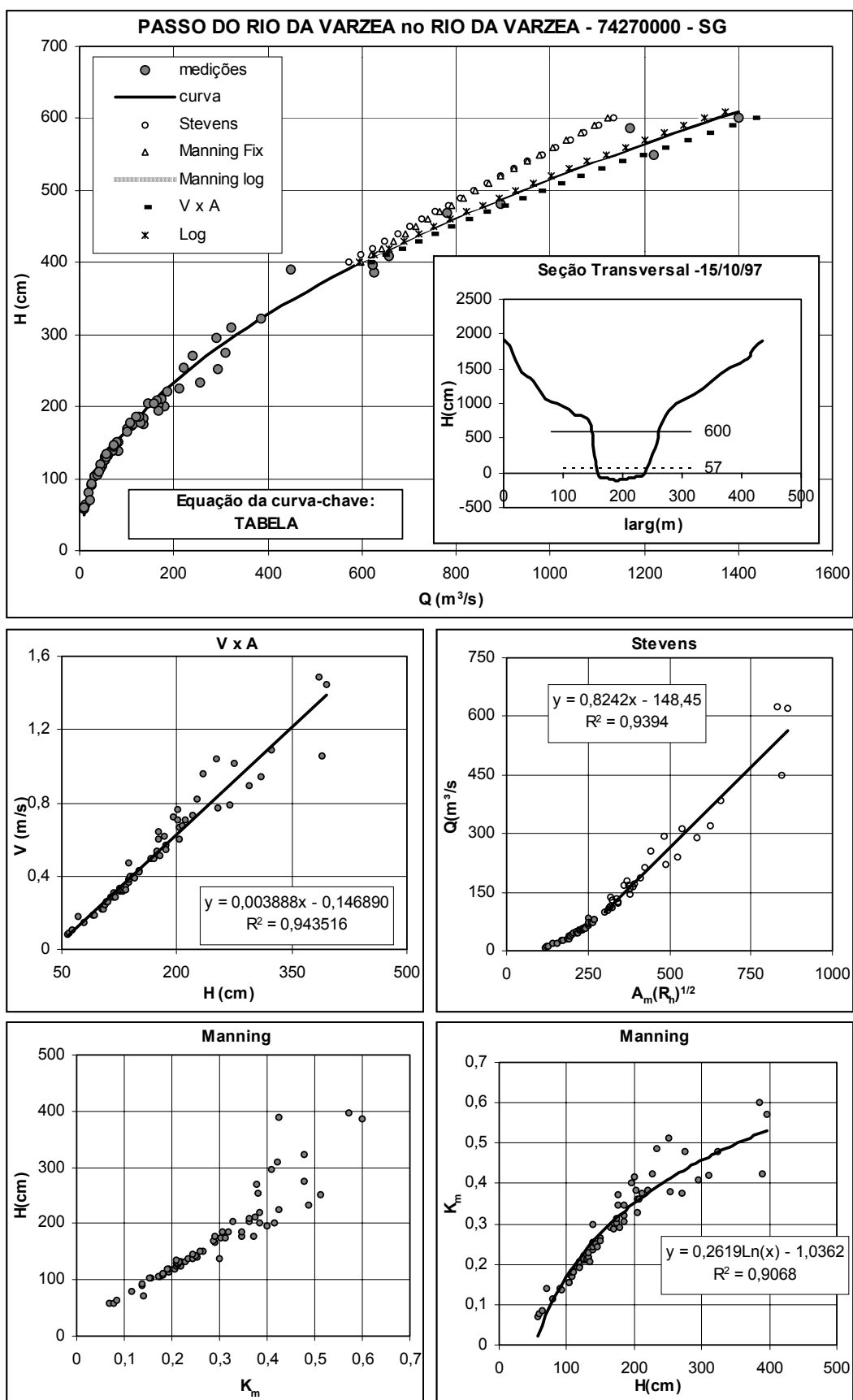


Figura D.29 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

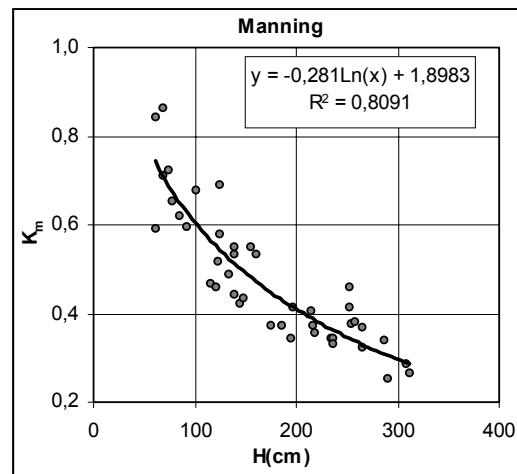
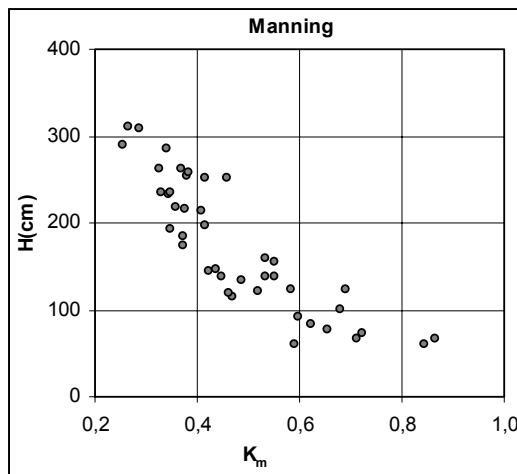
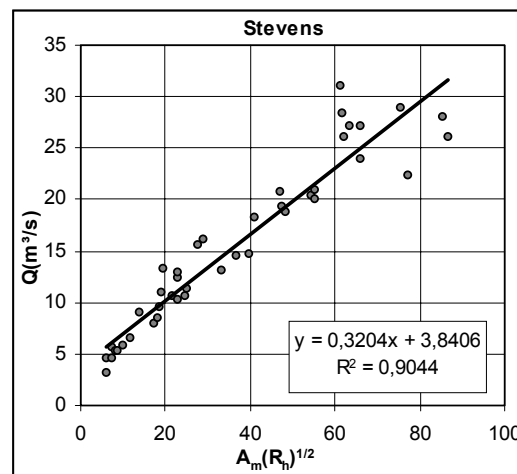
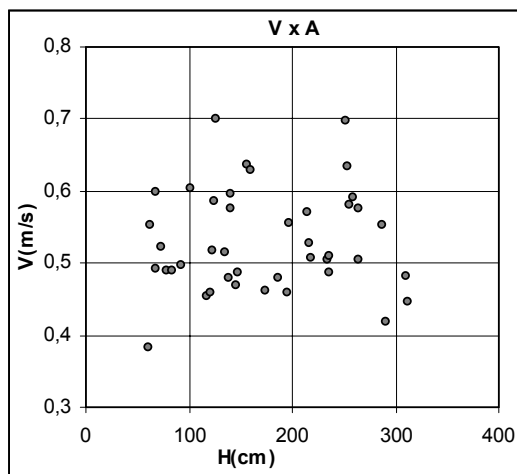
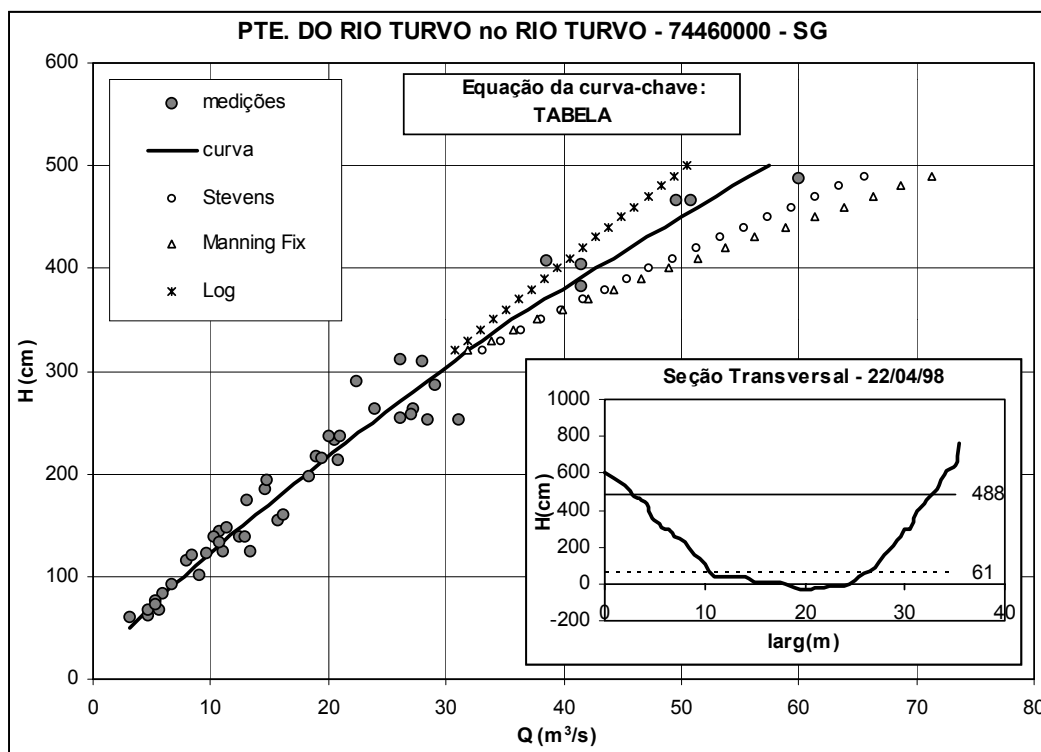


Figura D.30 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

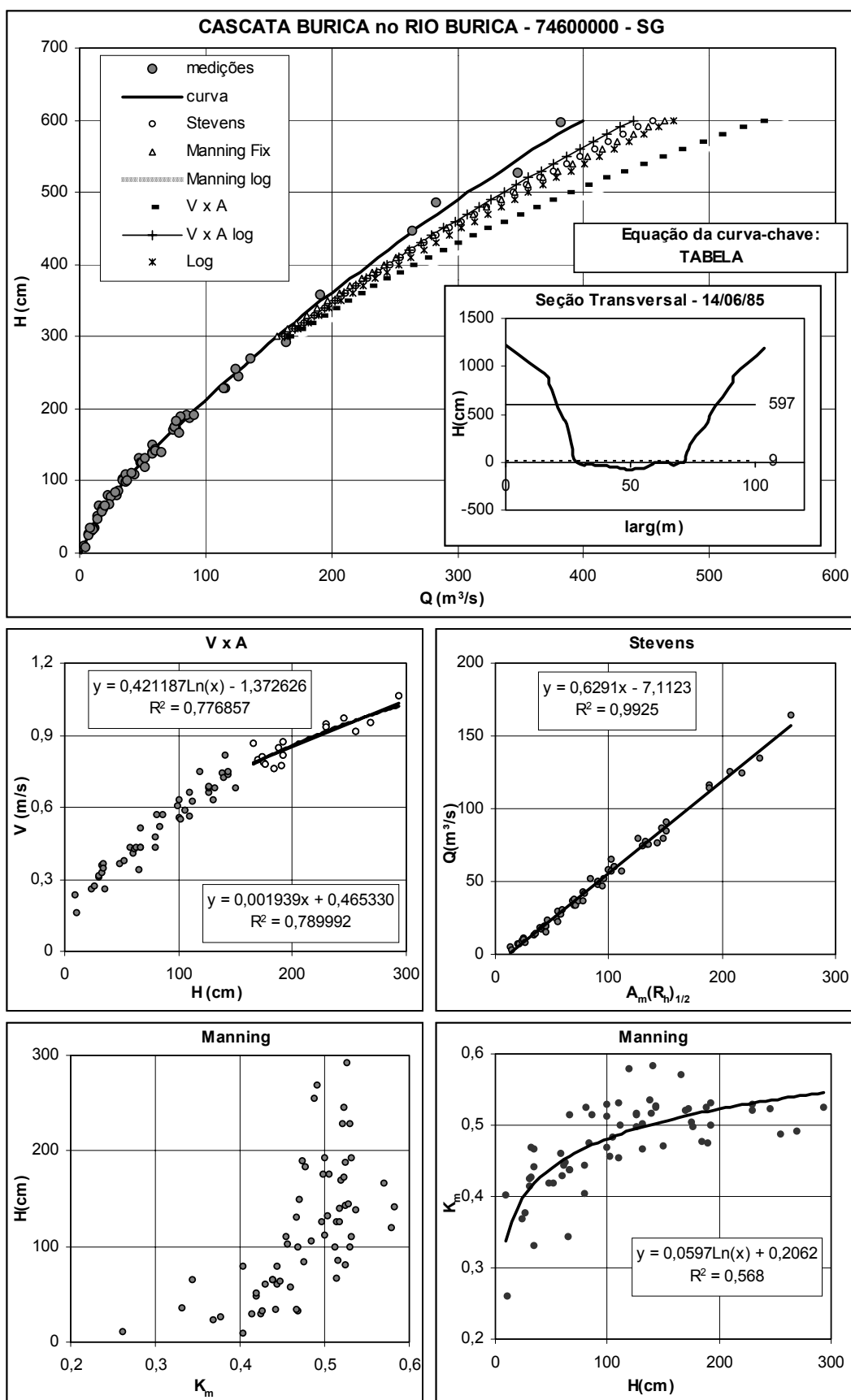


Figura D.31 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

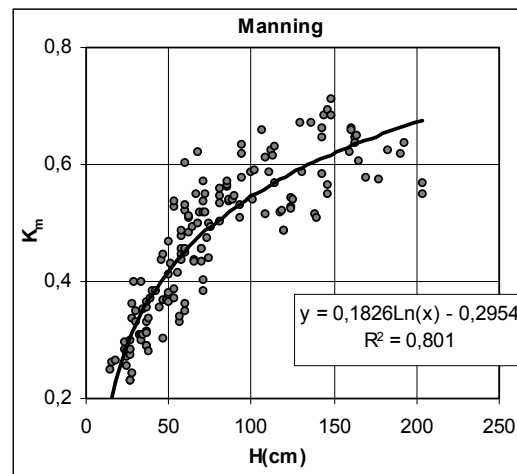
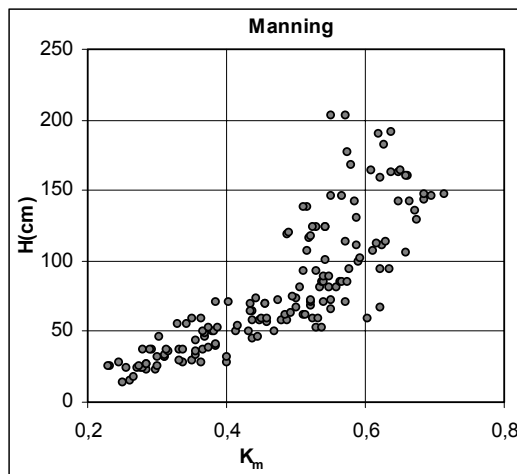
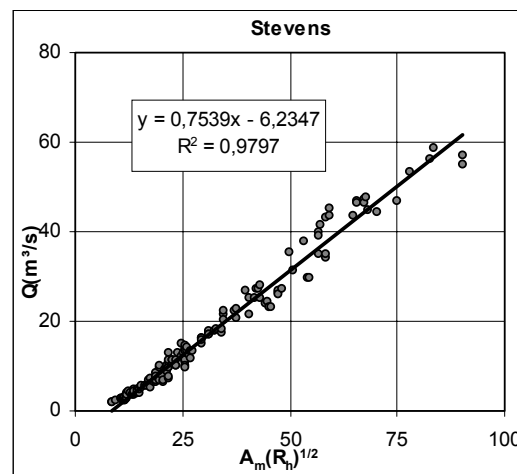
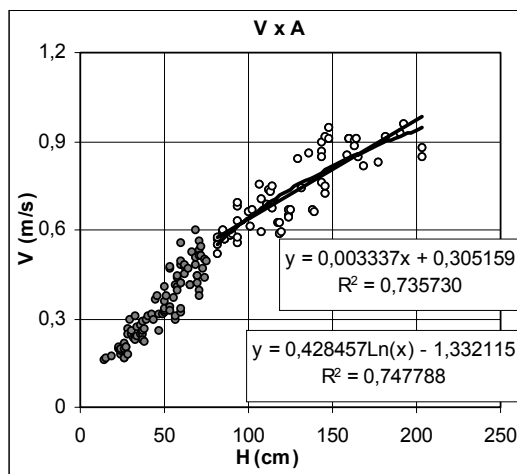
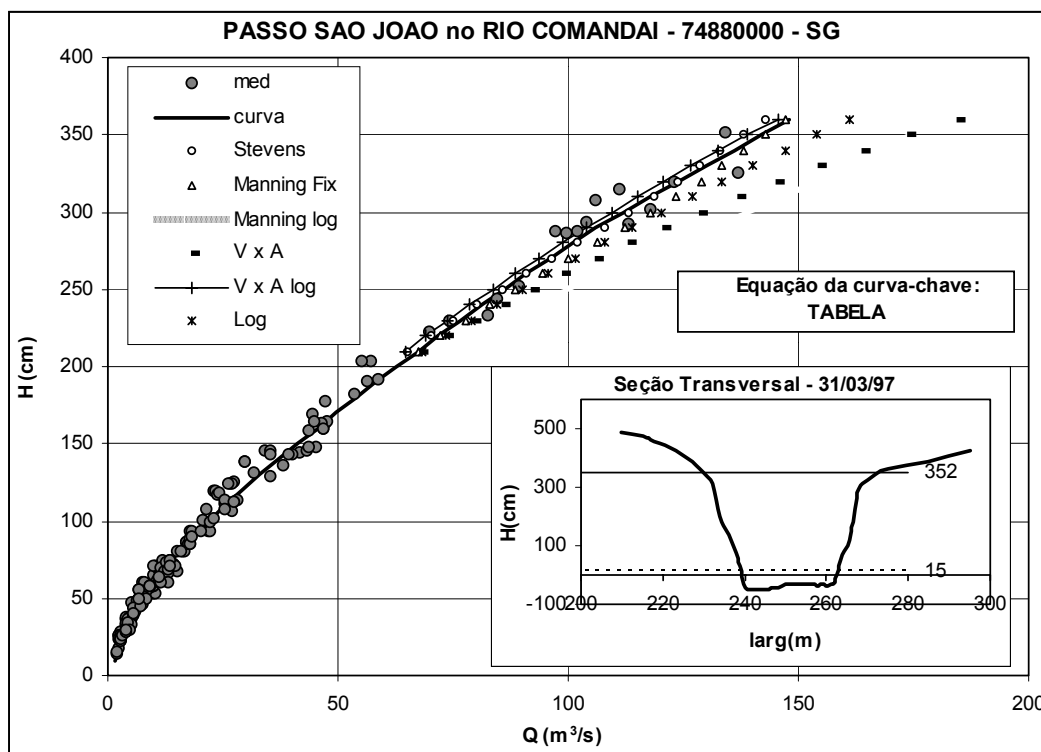


Figura D.32 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

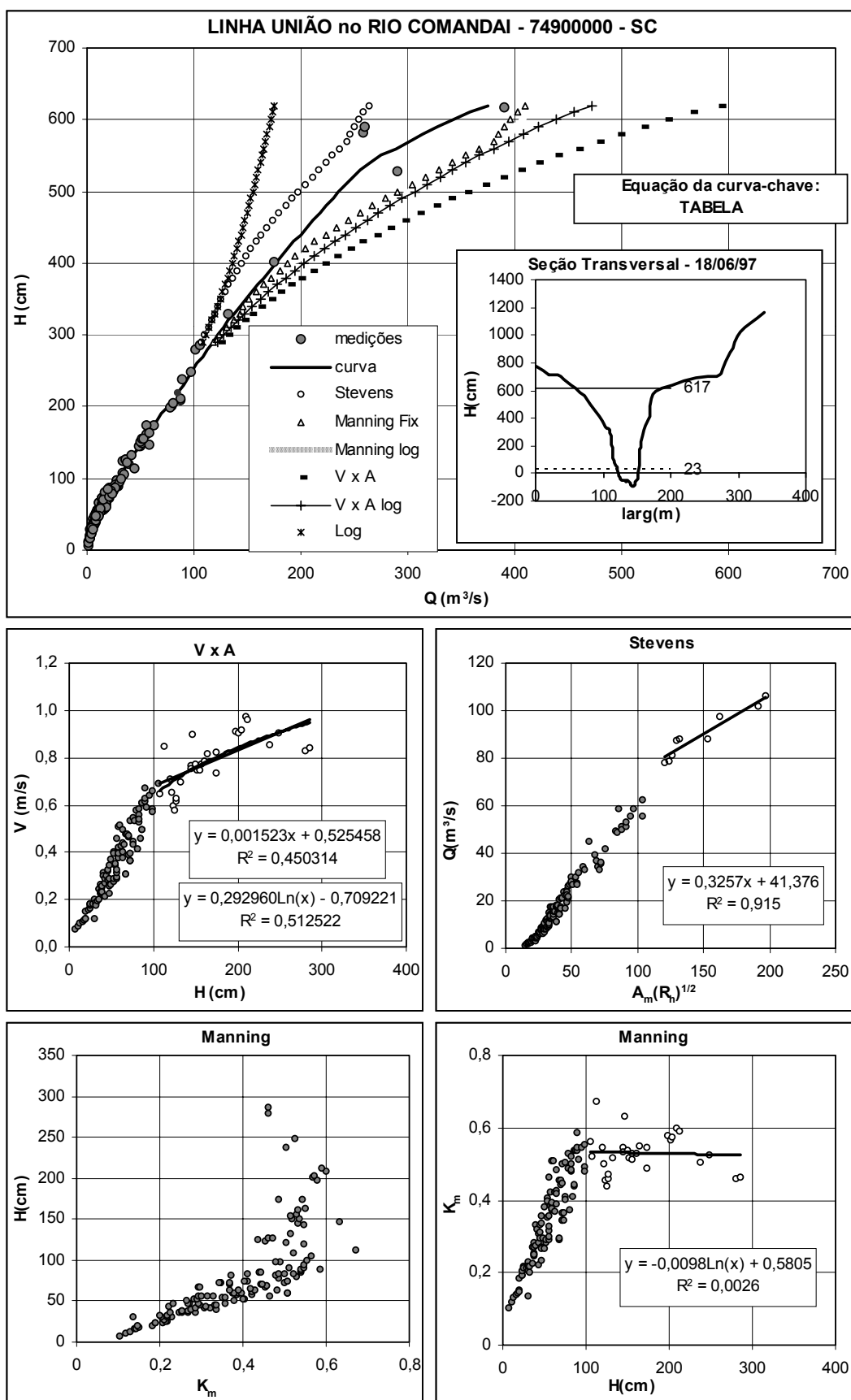


Figura D.33 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

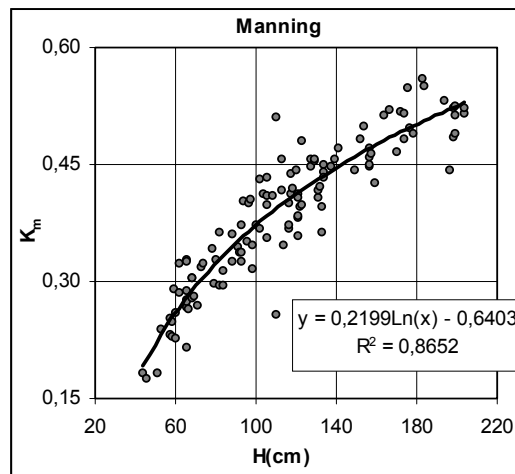
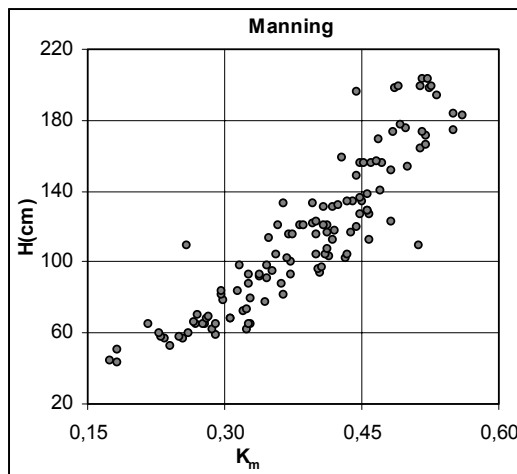
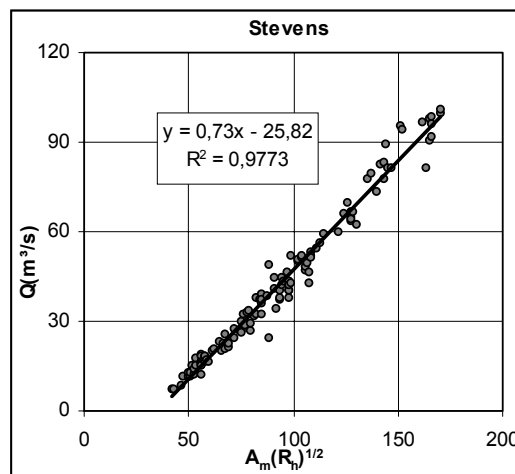
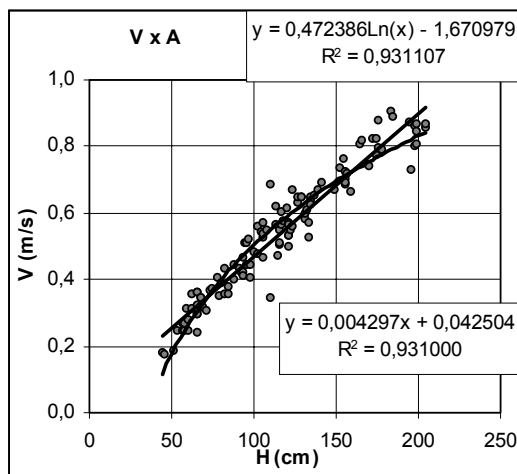
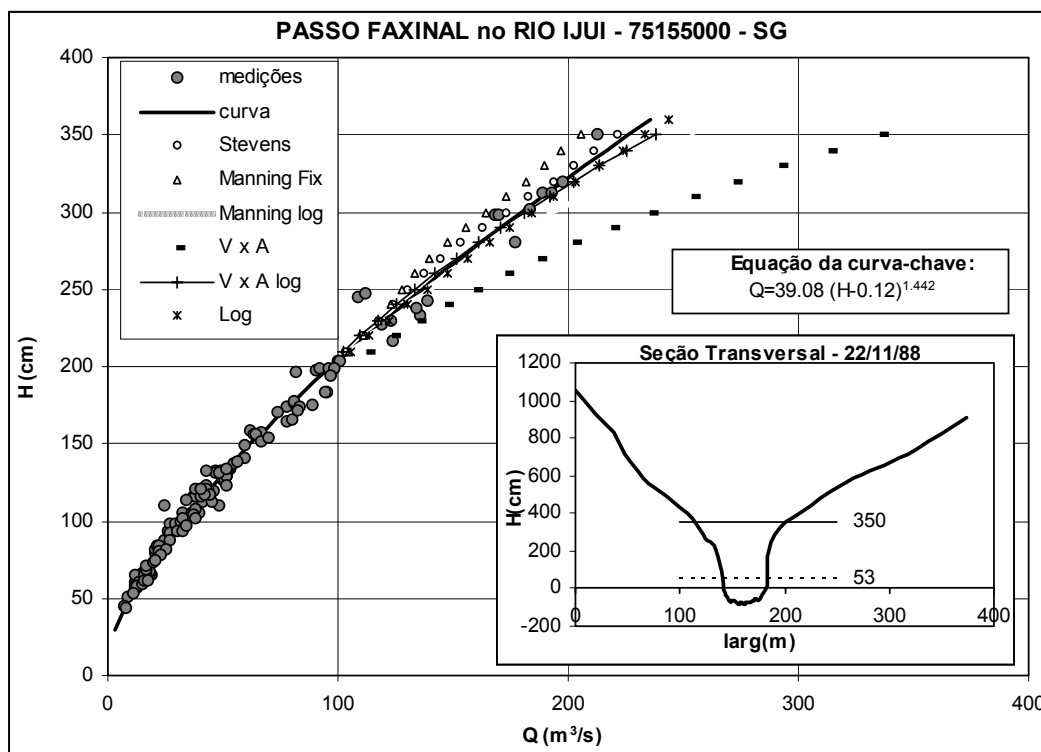


Figura D.34 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

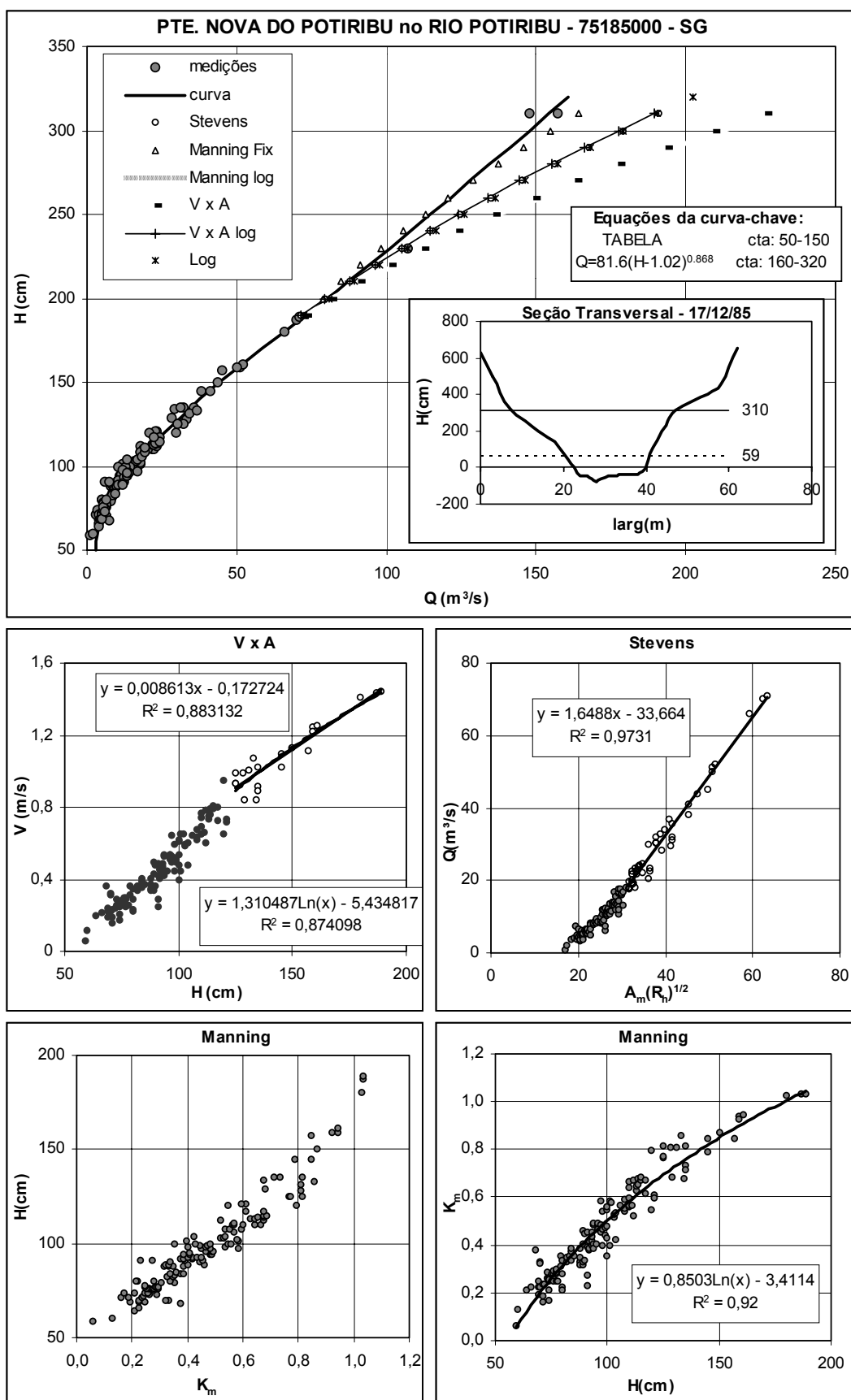


Figura D.35 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

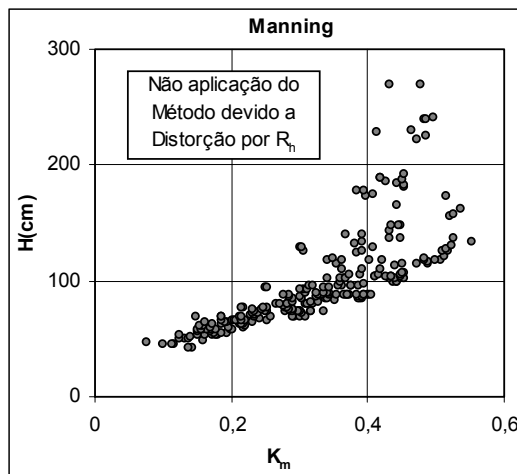
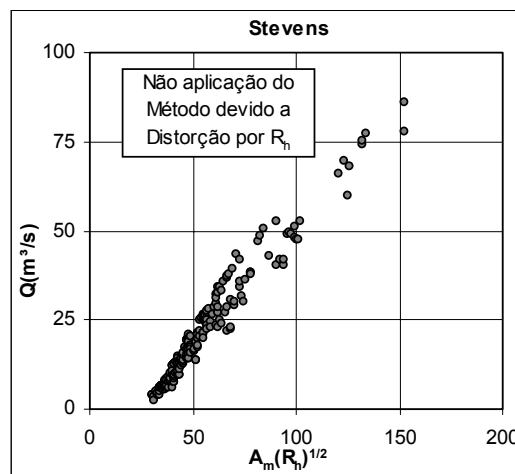
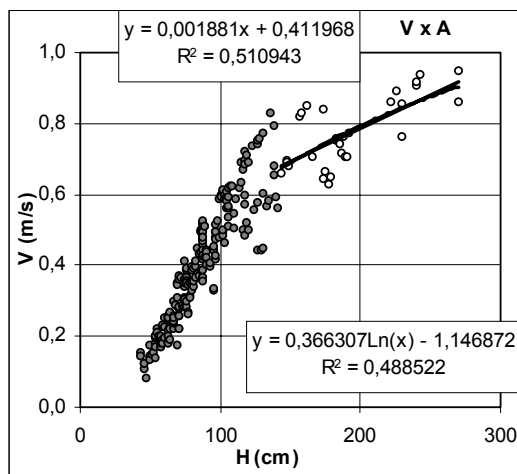
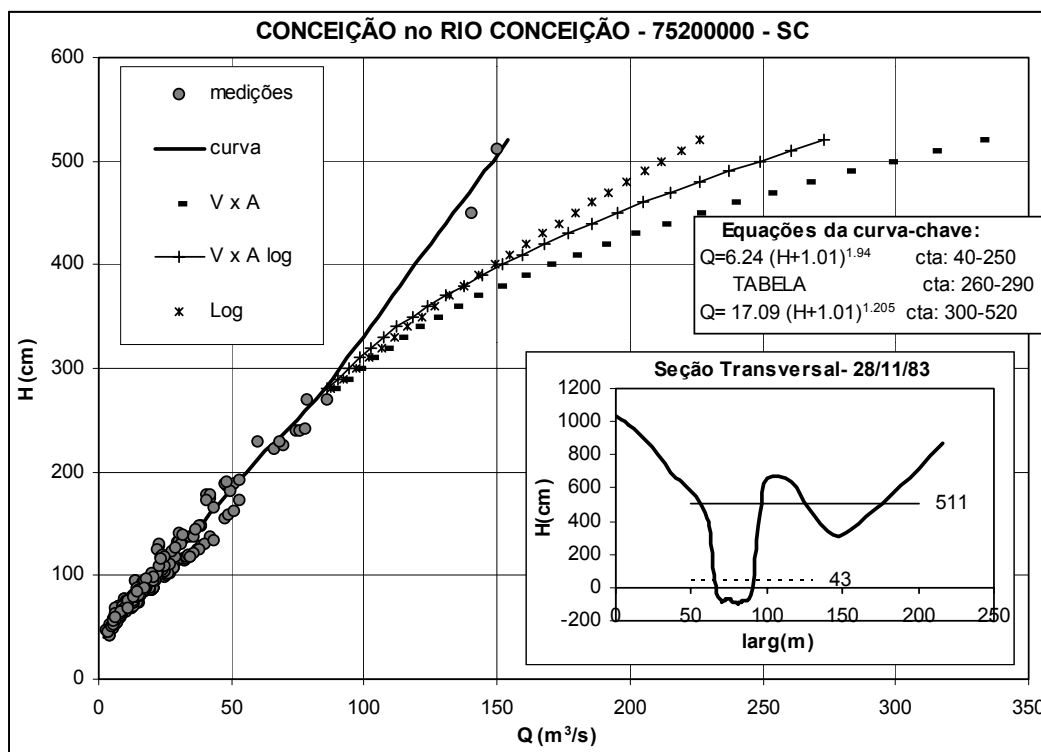


Figura D.36 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

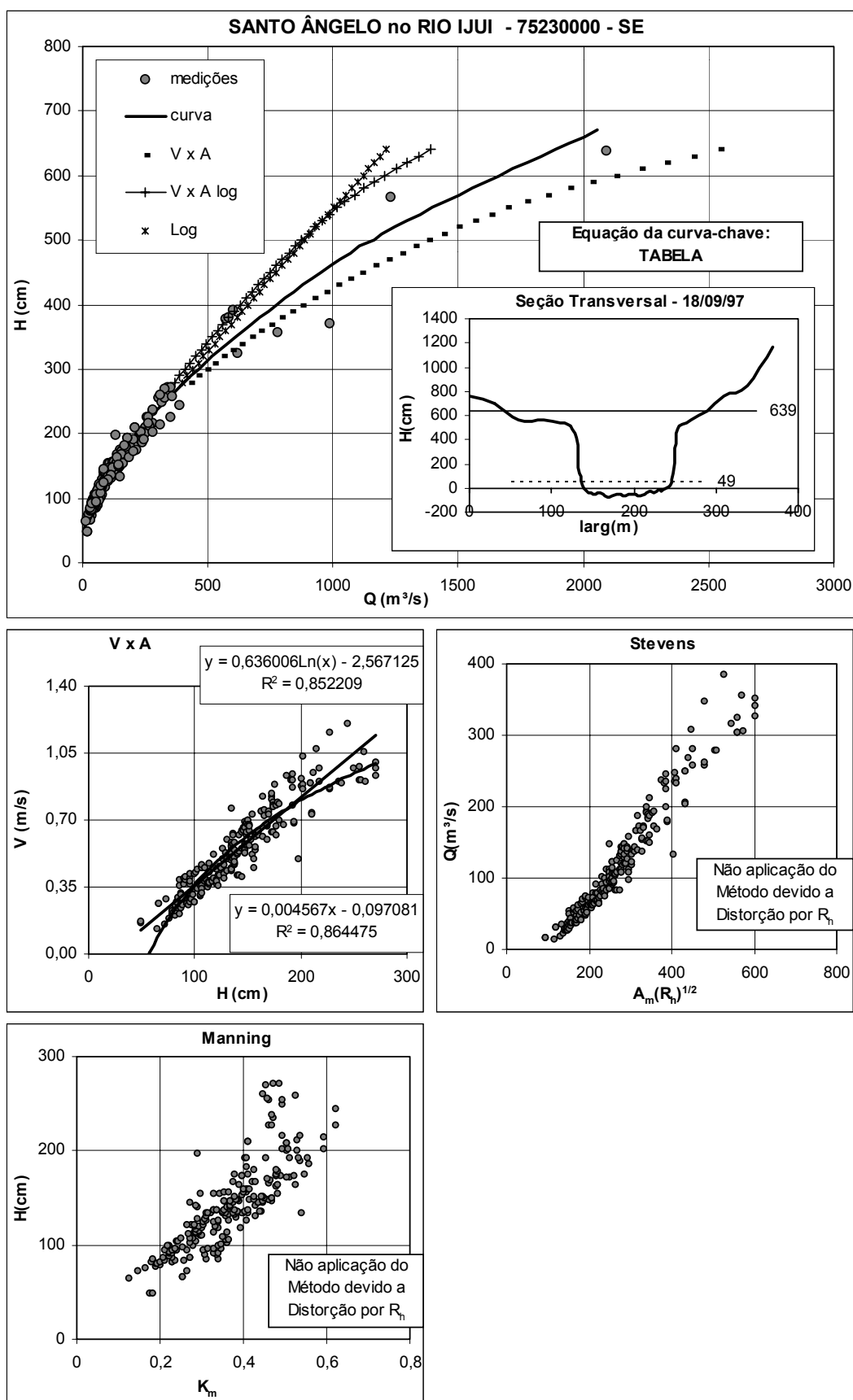


Figura D.37 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

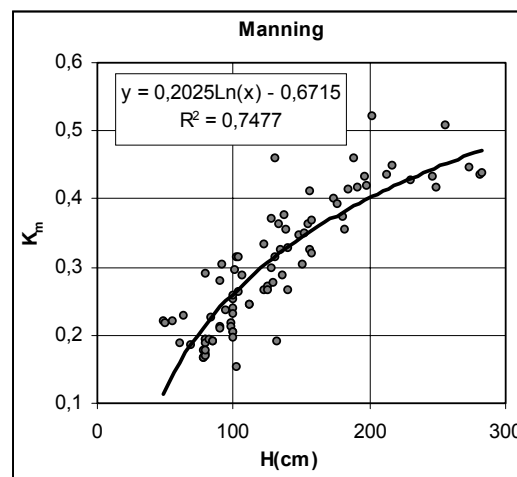
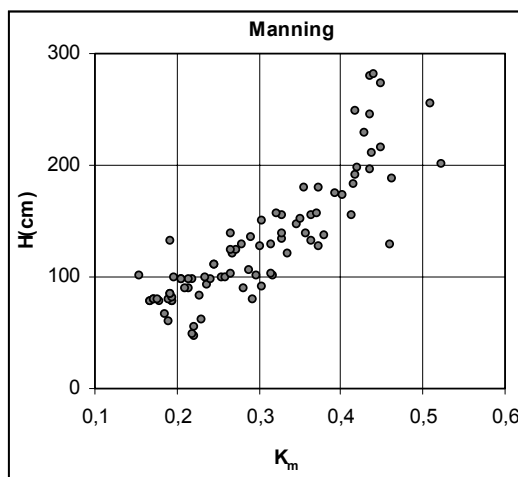
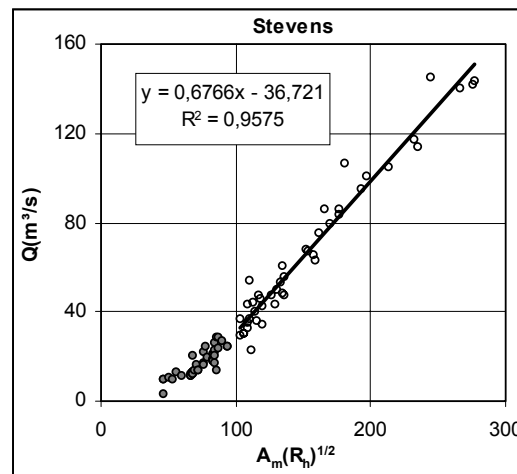
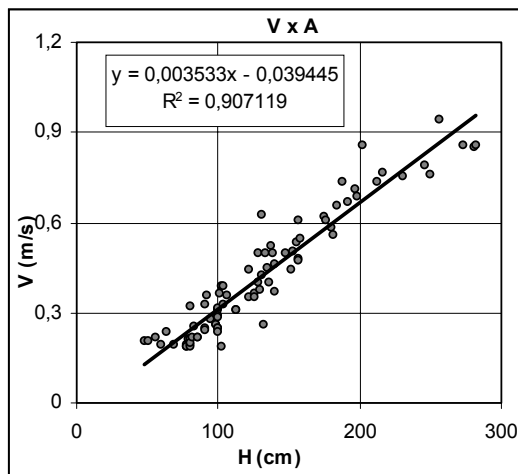
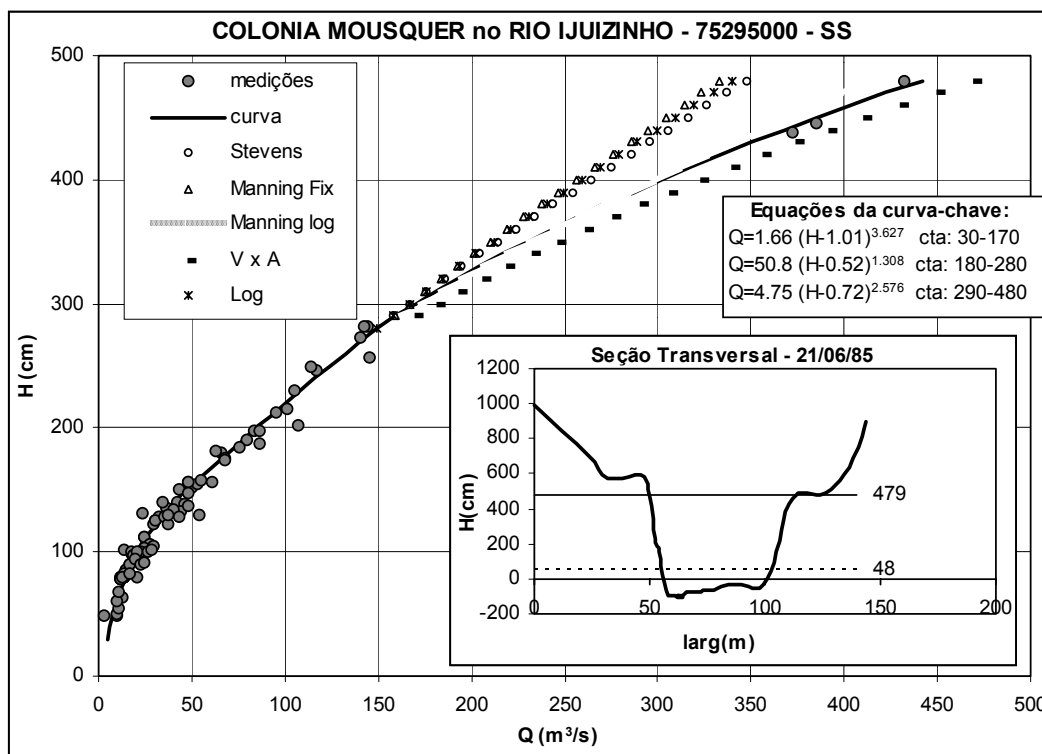


Figura D.38 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

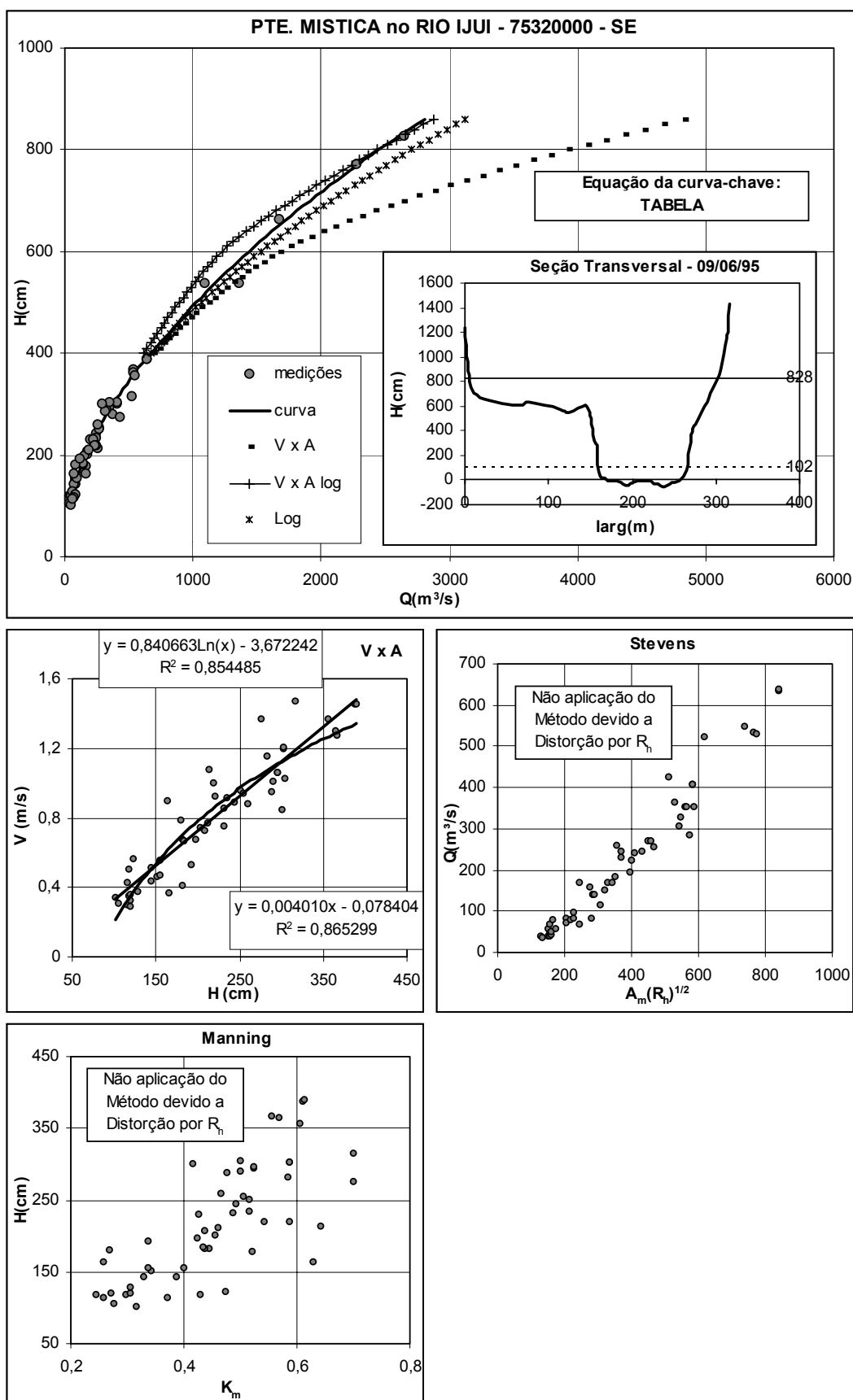


Figura D.39 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

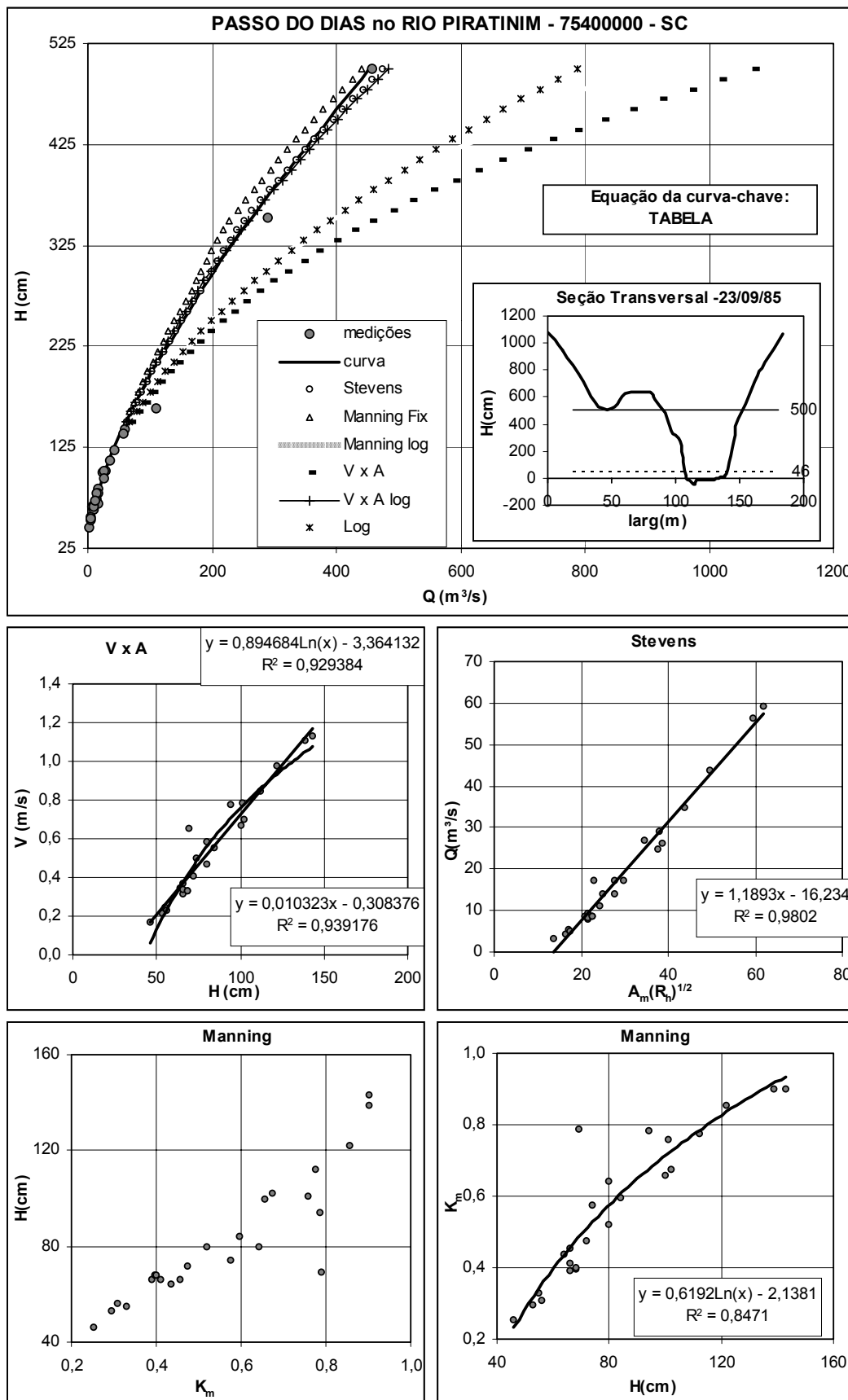


Figura D.40 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

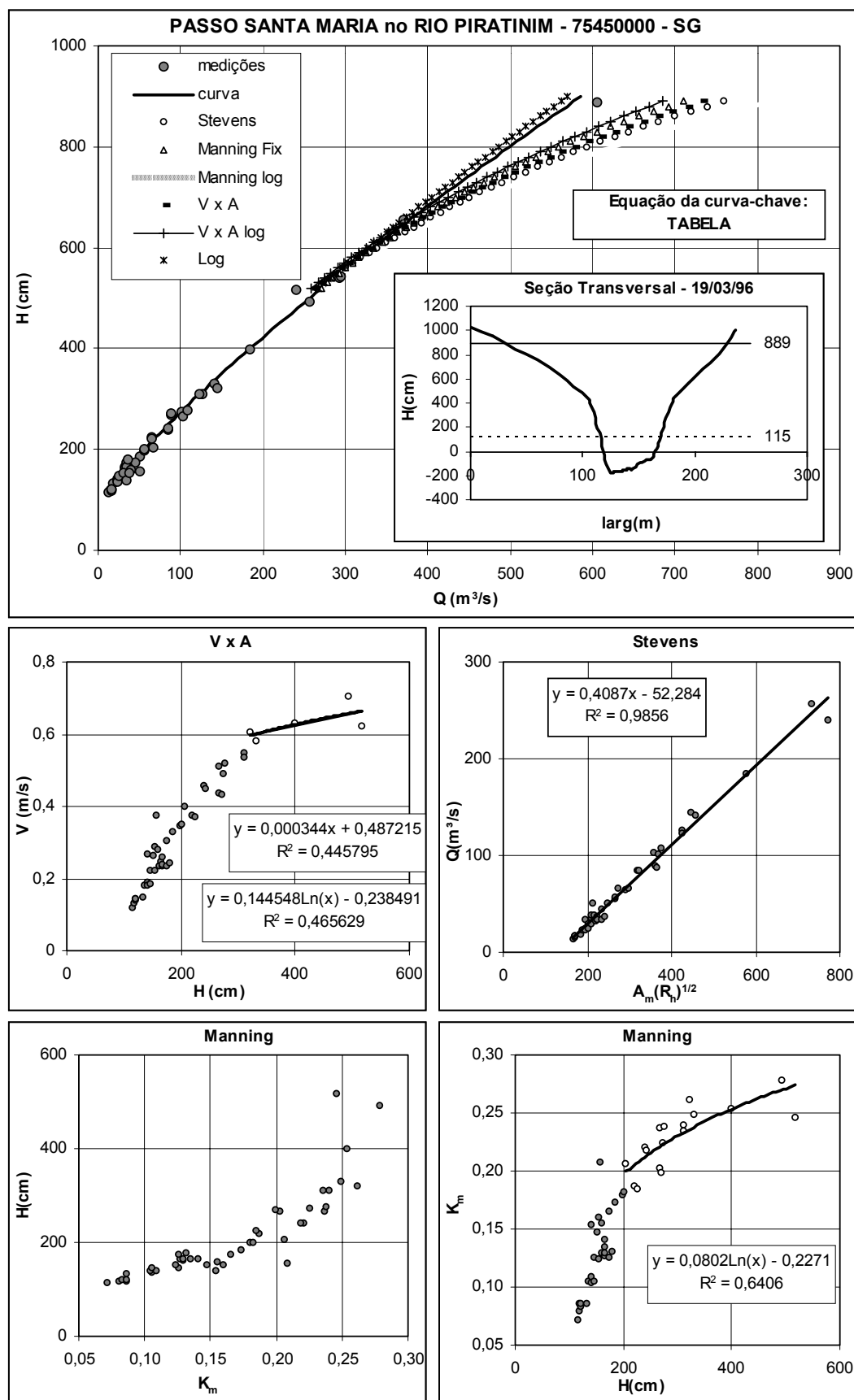


Figura D.41 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

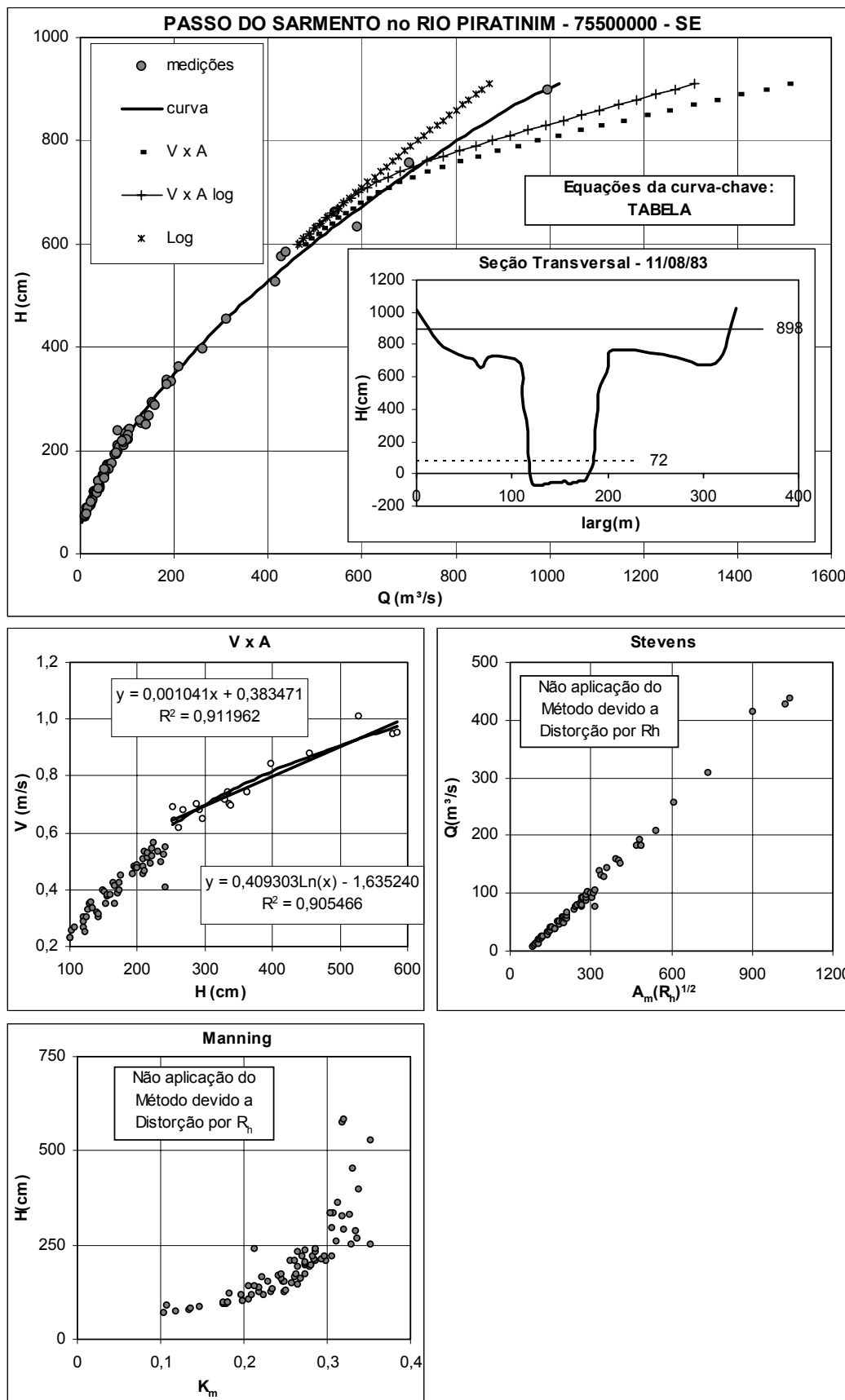


Figura D.42 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

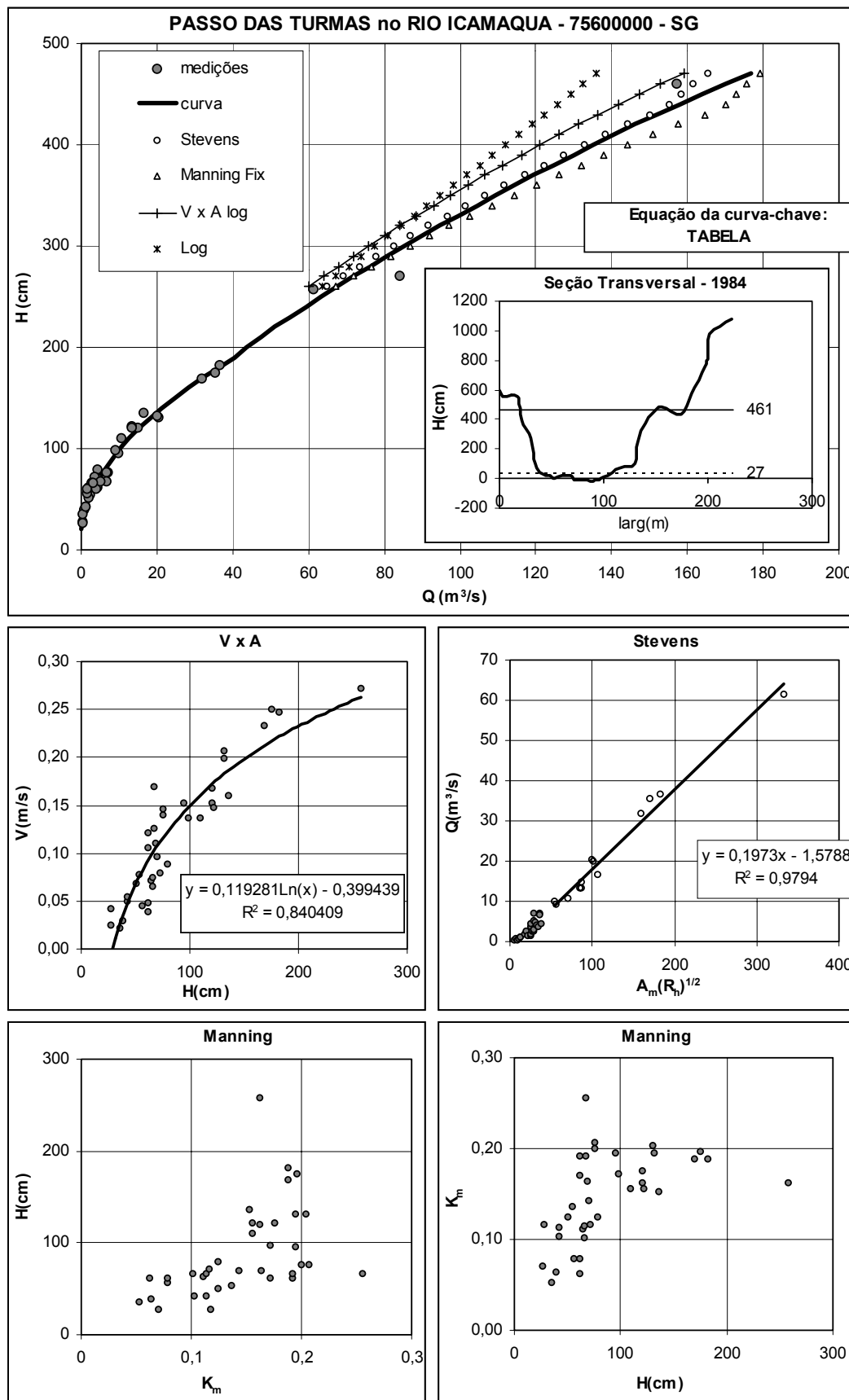


Figura D.43 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

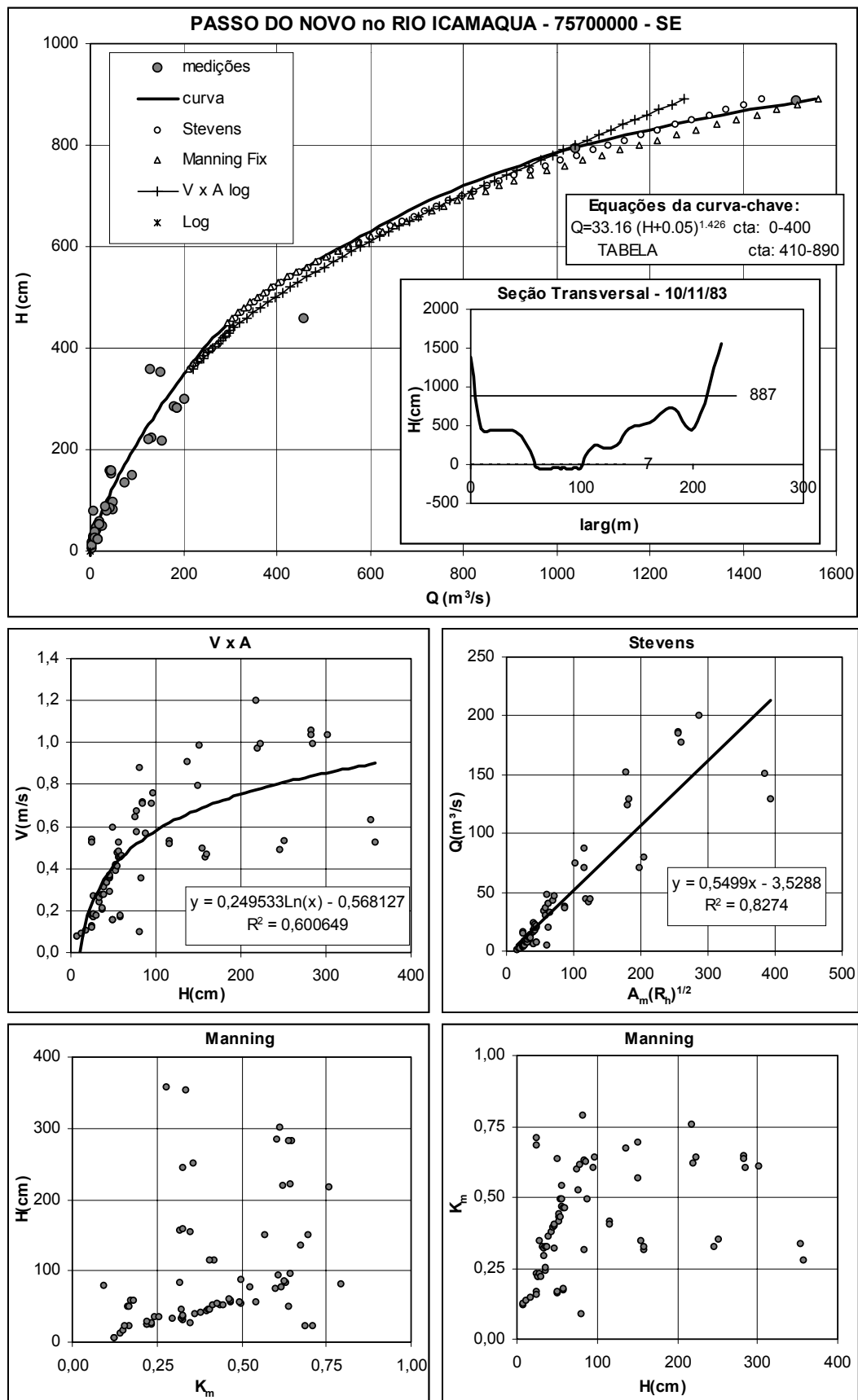


Figura D.44 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

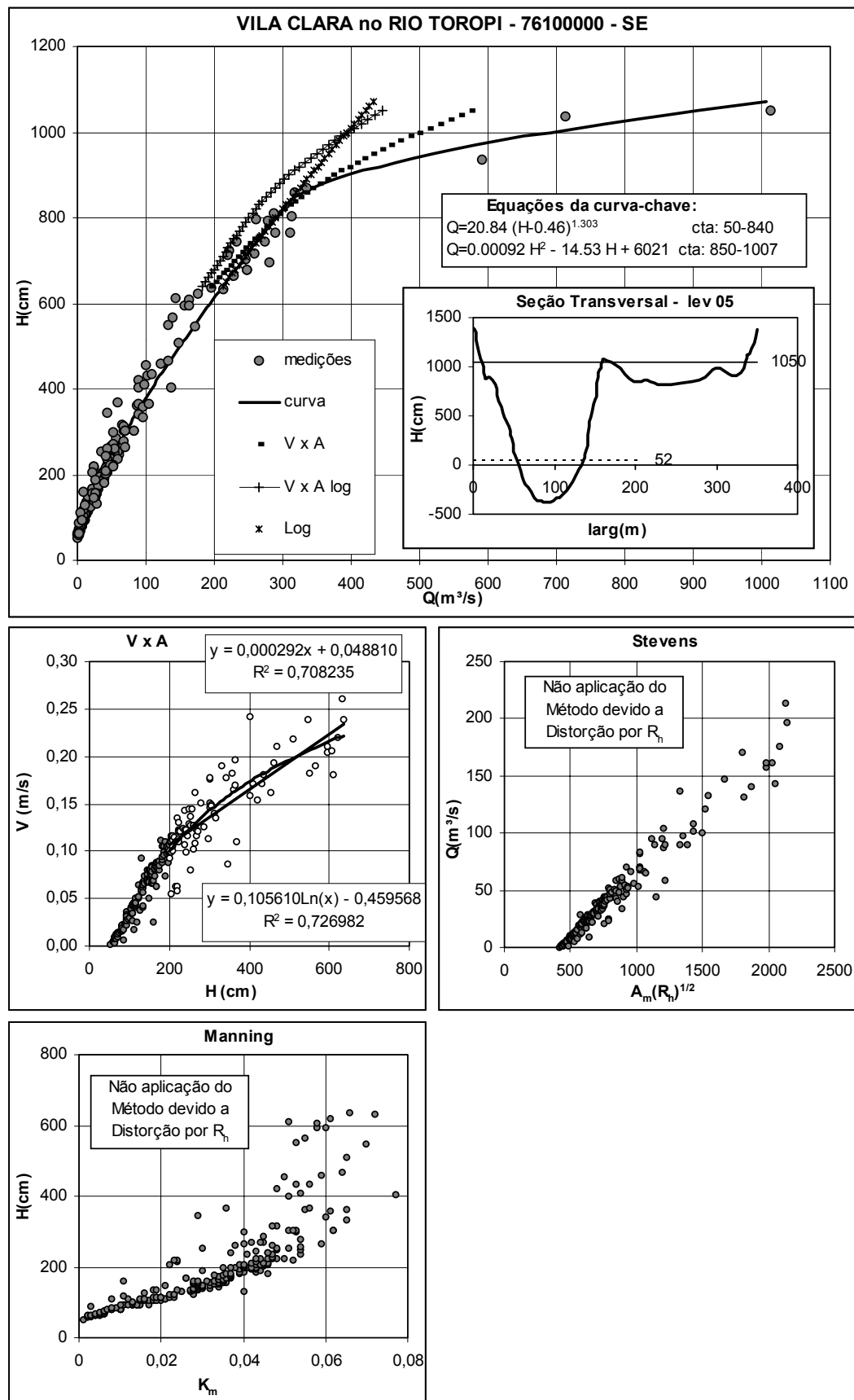


Figura D.45 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

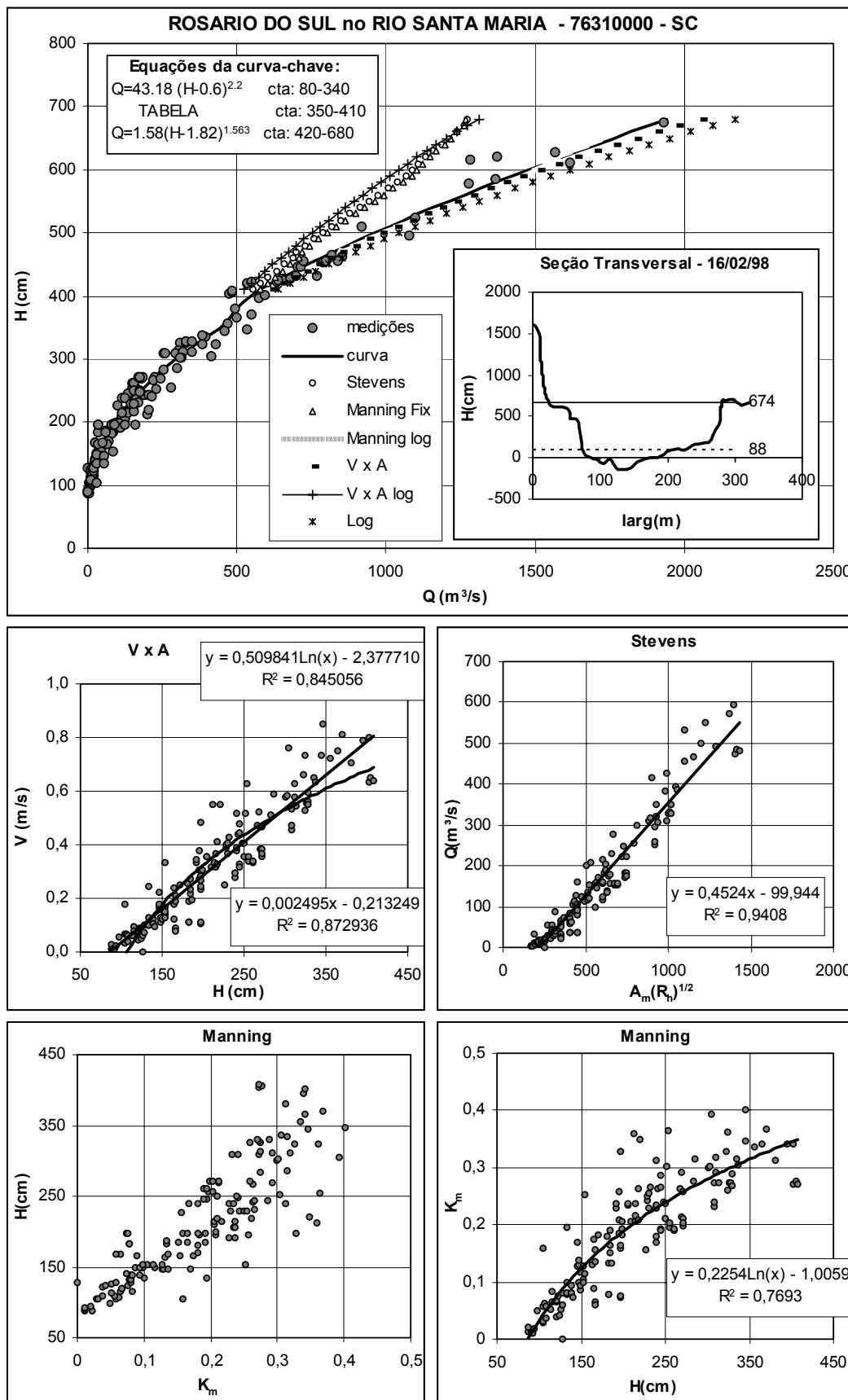


Figura D.46 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

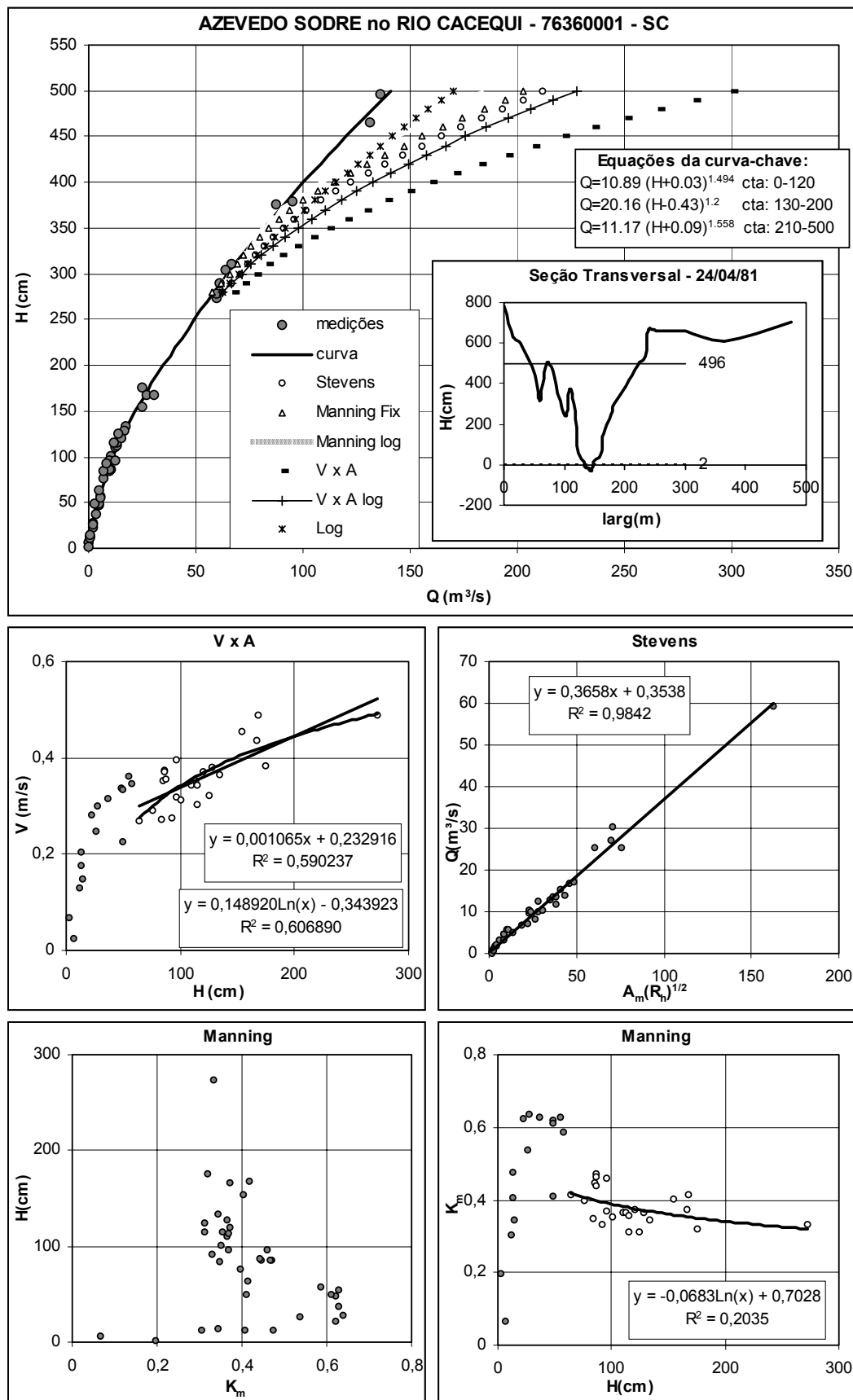


Figura D.47 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

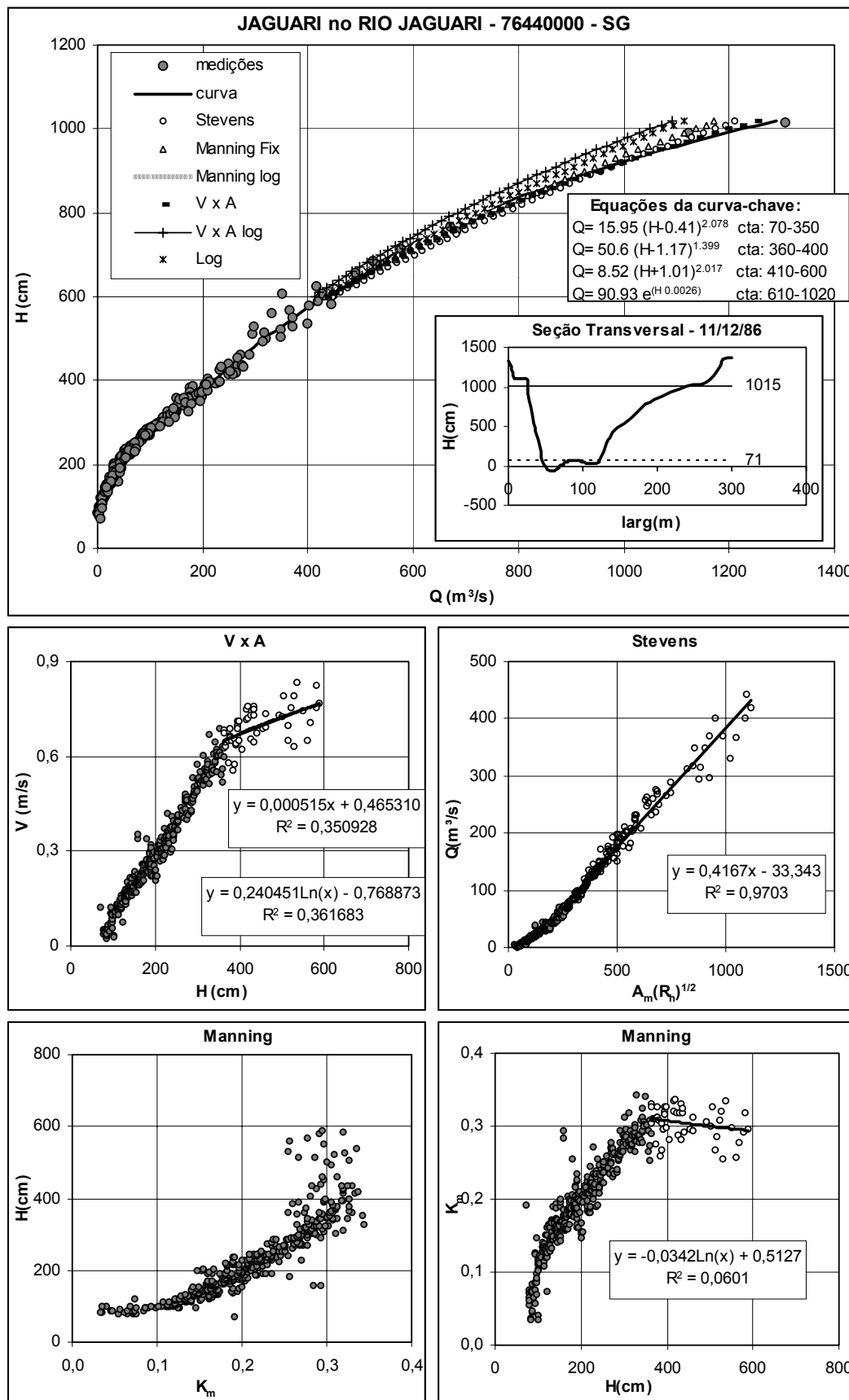


Figura D.48 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

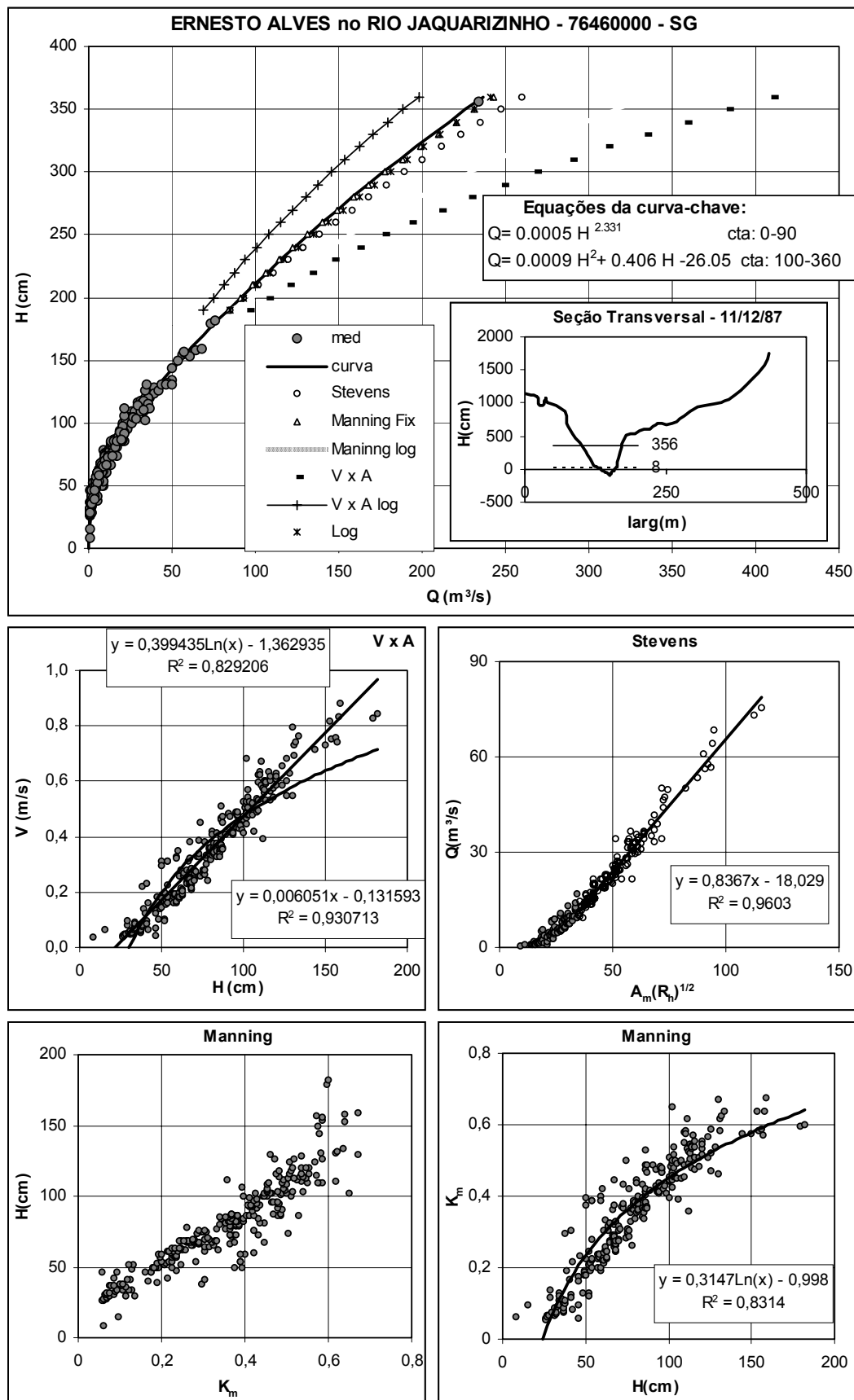


Figura D.49 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

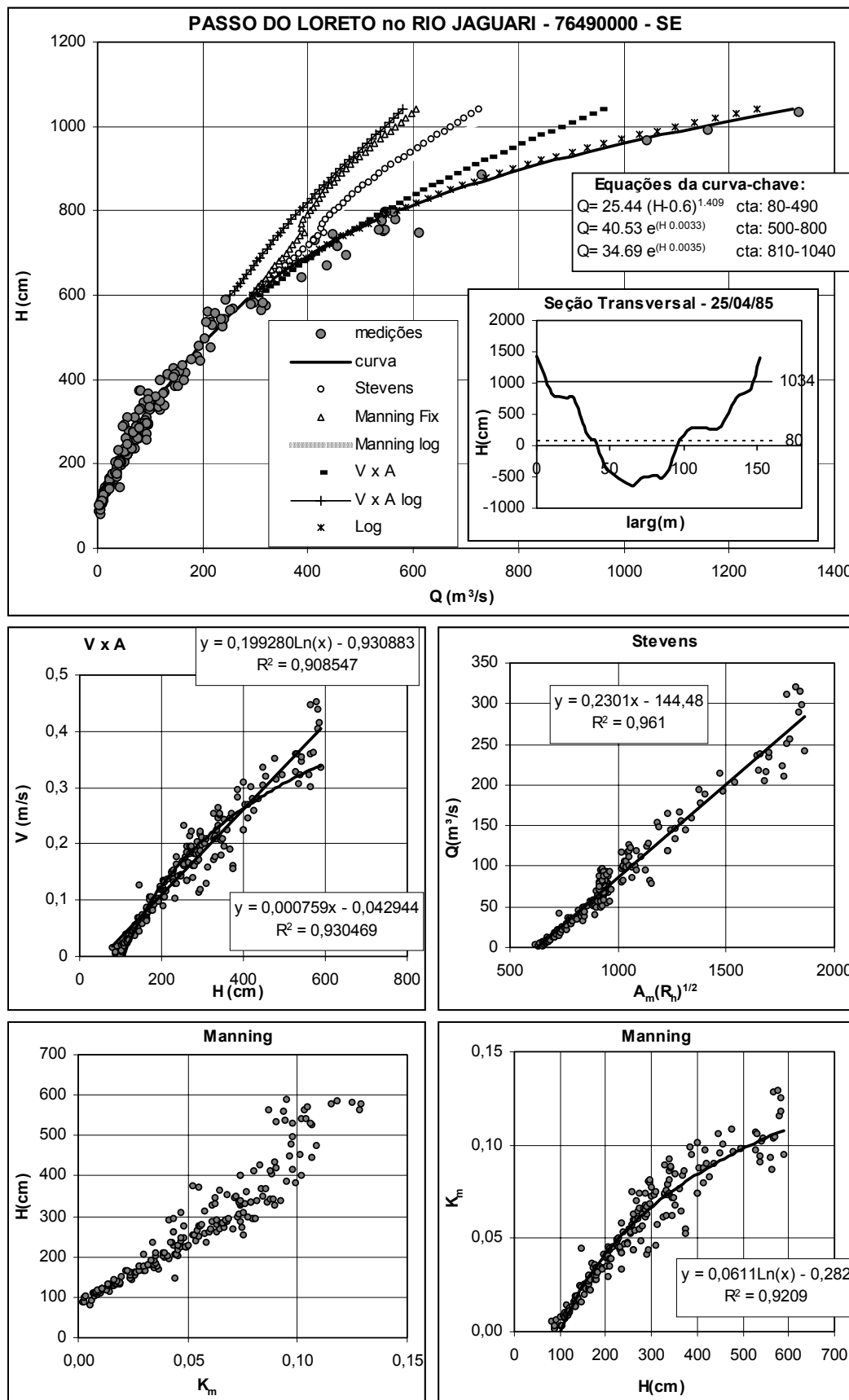


Figura D.50 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

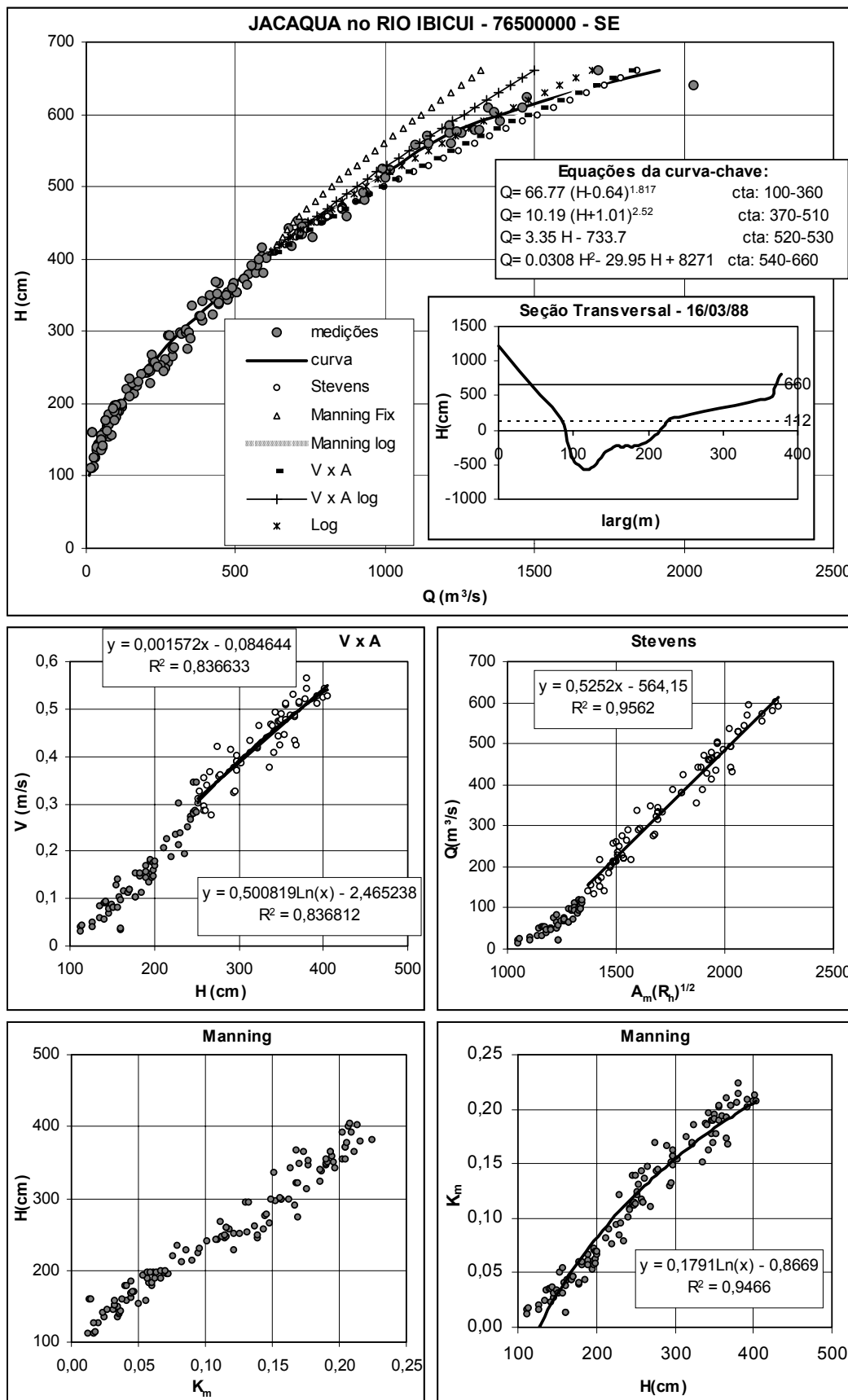


Figura D.51 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

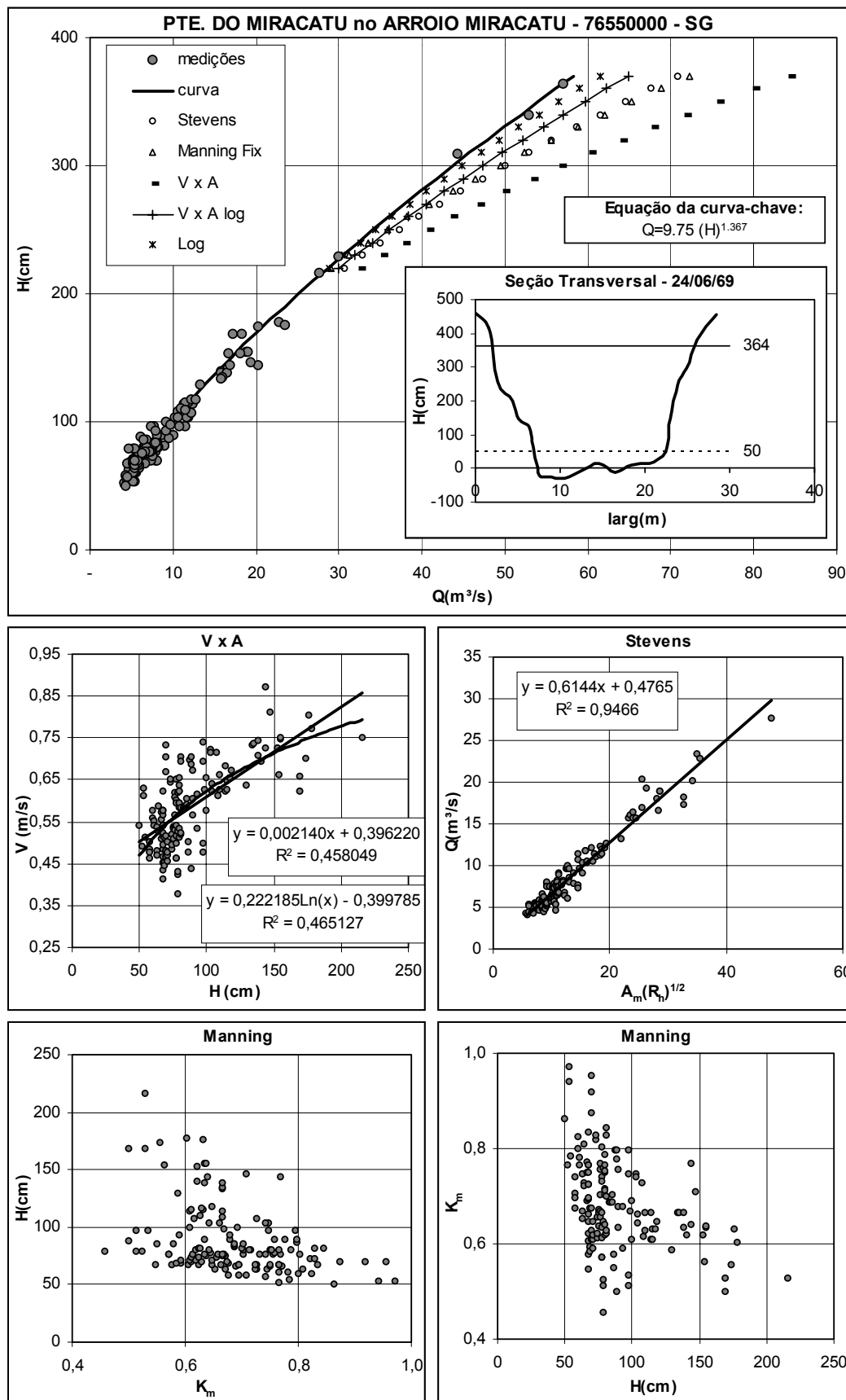


Figura D.52 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

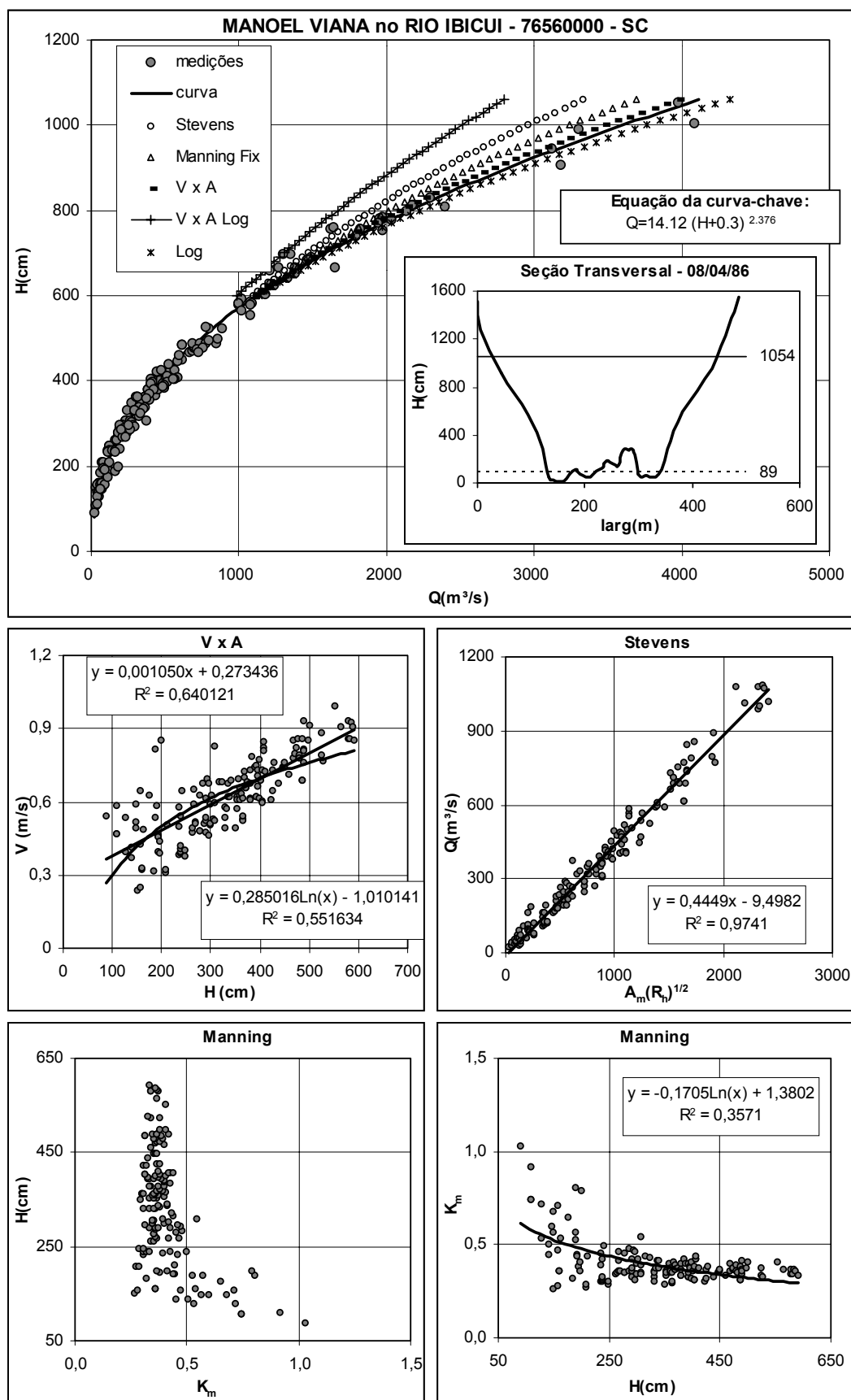


Figura D.53 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

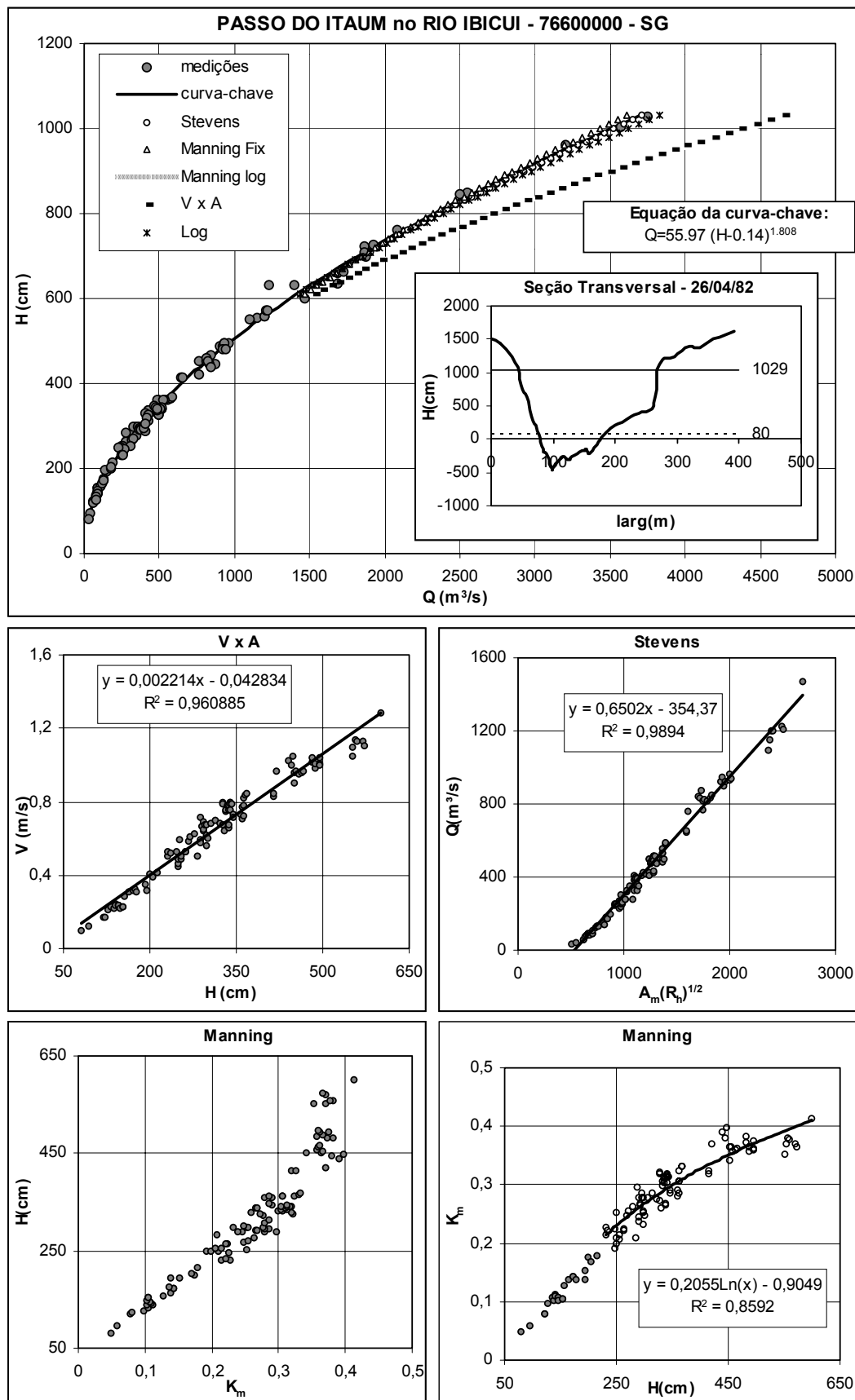


Figura D.54 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

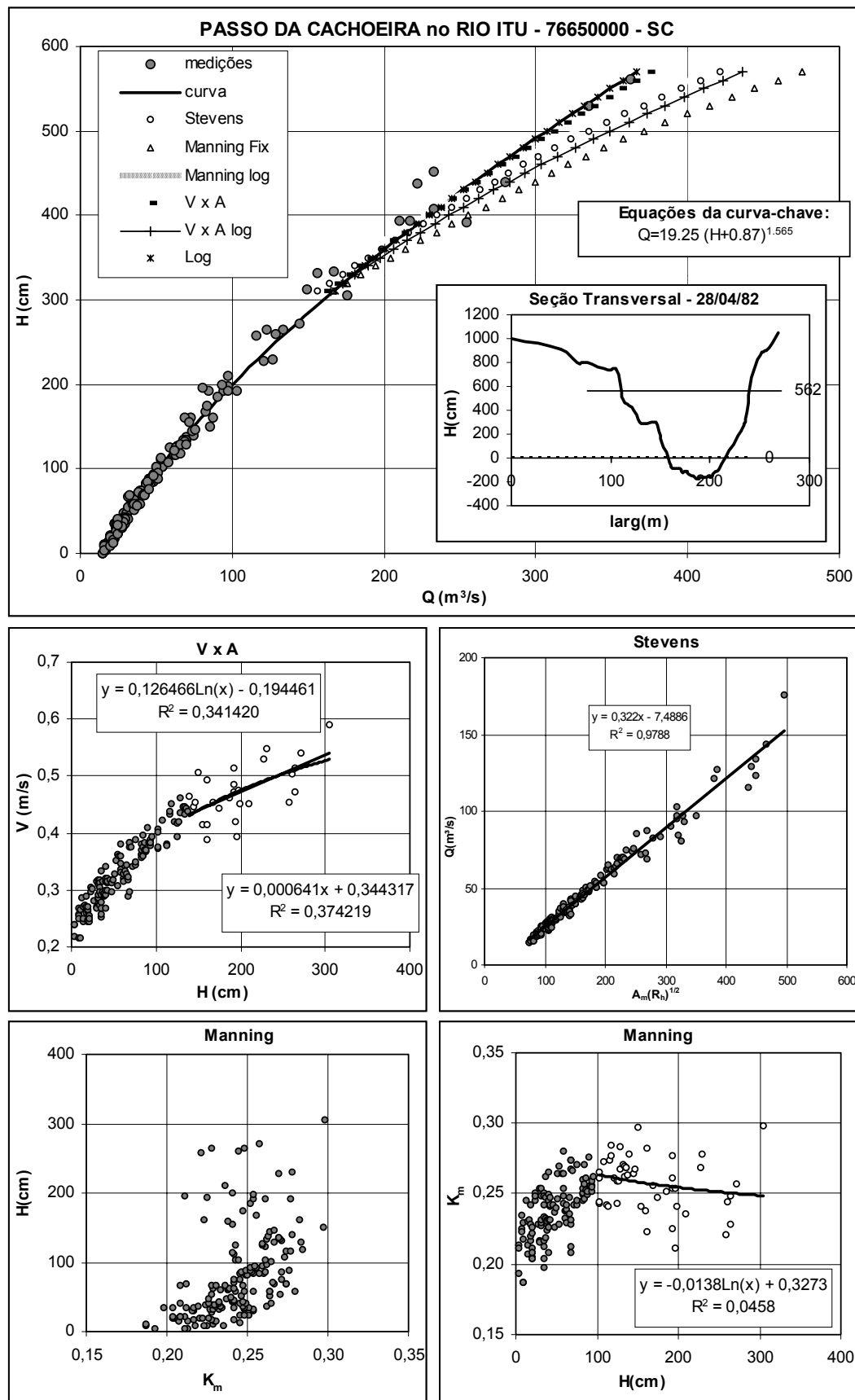


Figura D.55 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

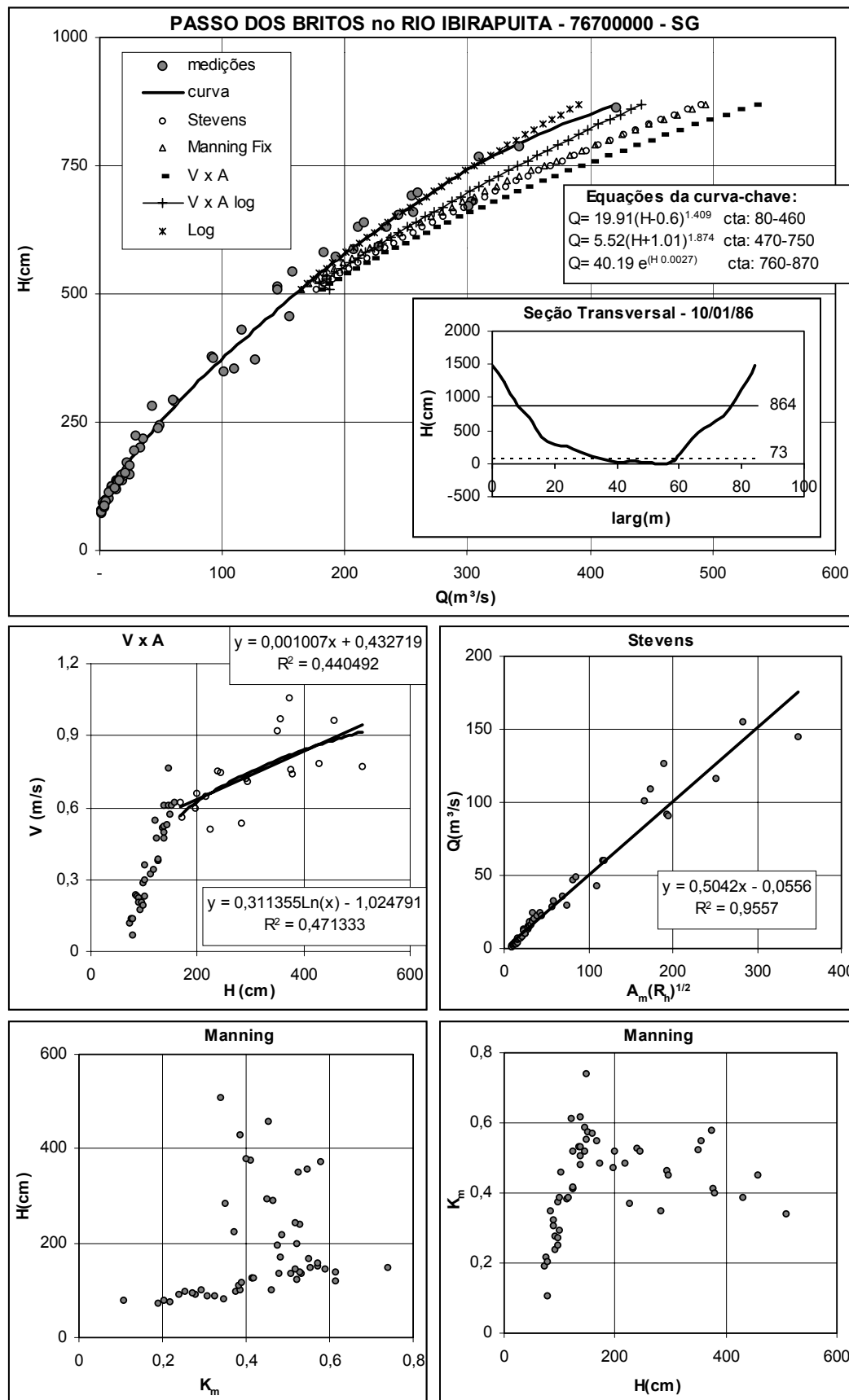


Figura D.56 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

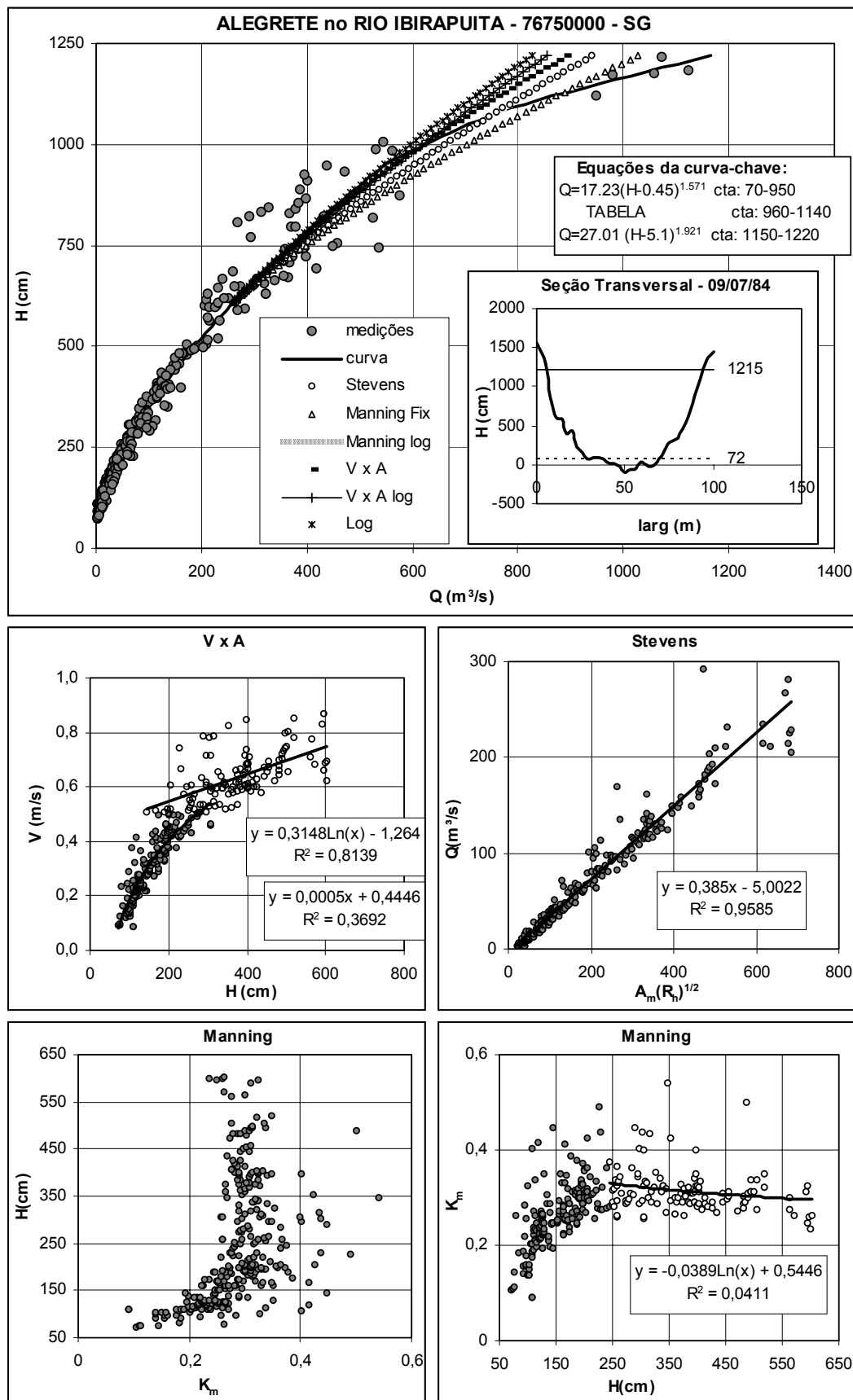


Figura D.57 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

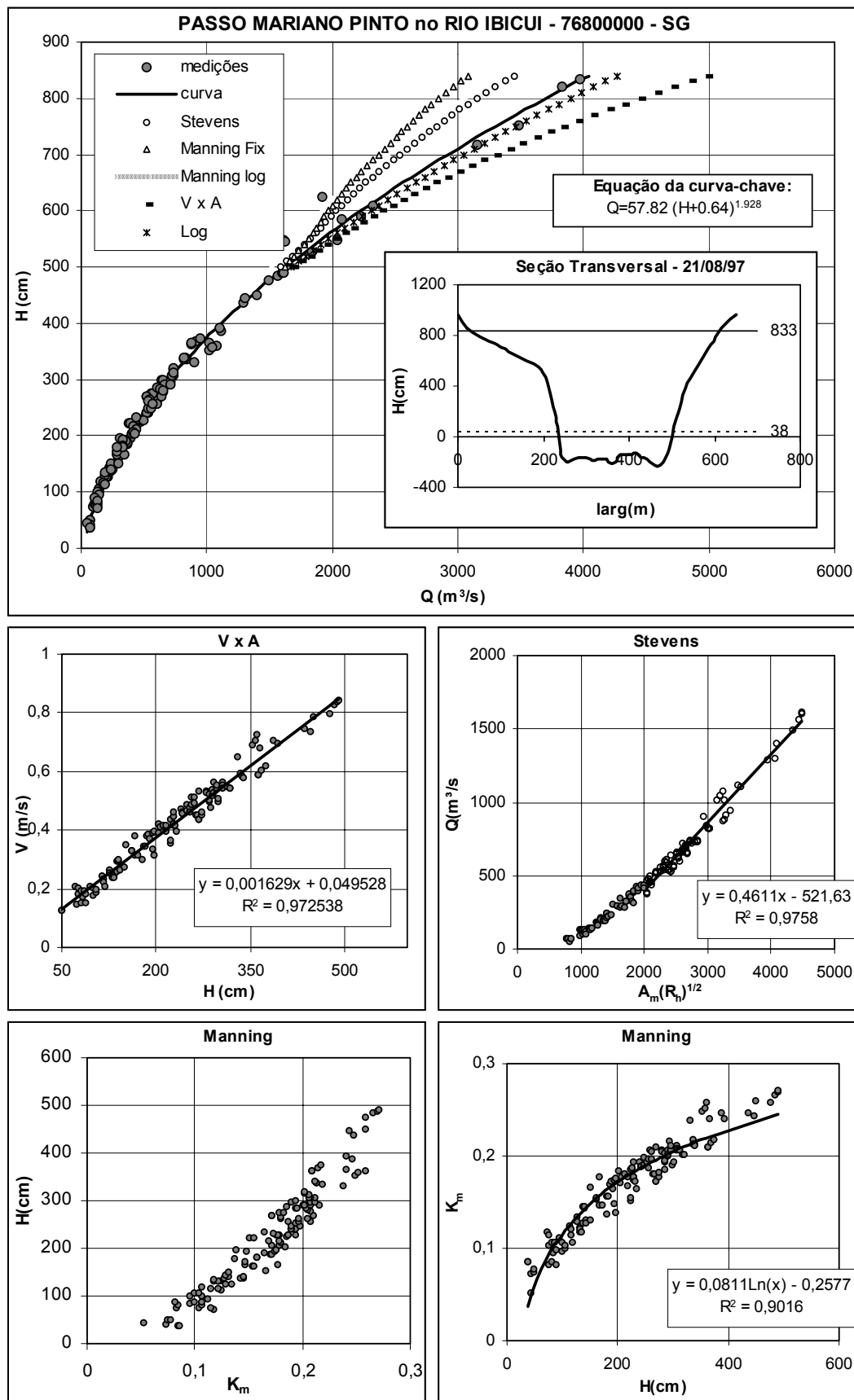


Figura D.58 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

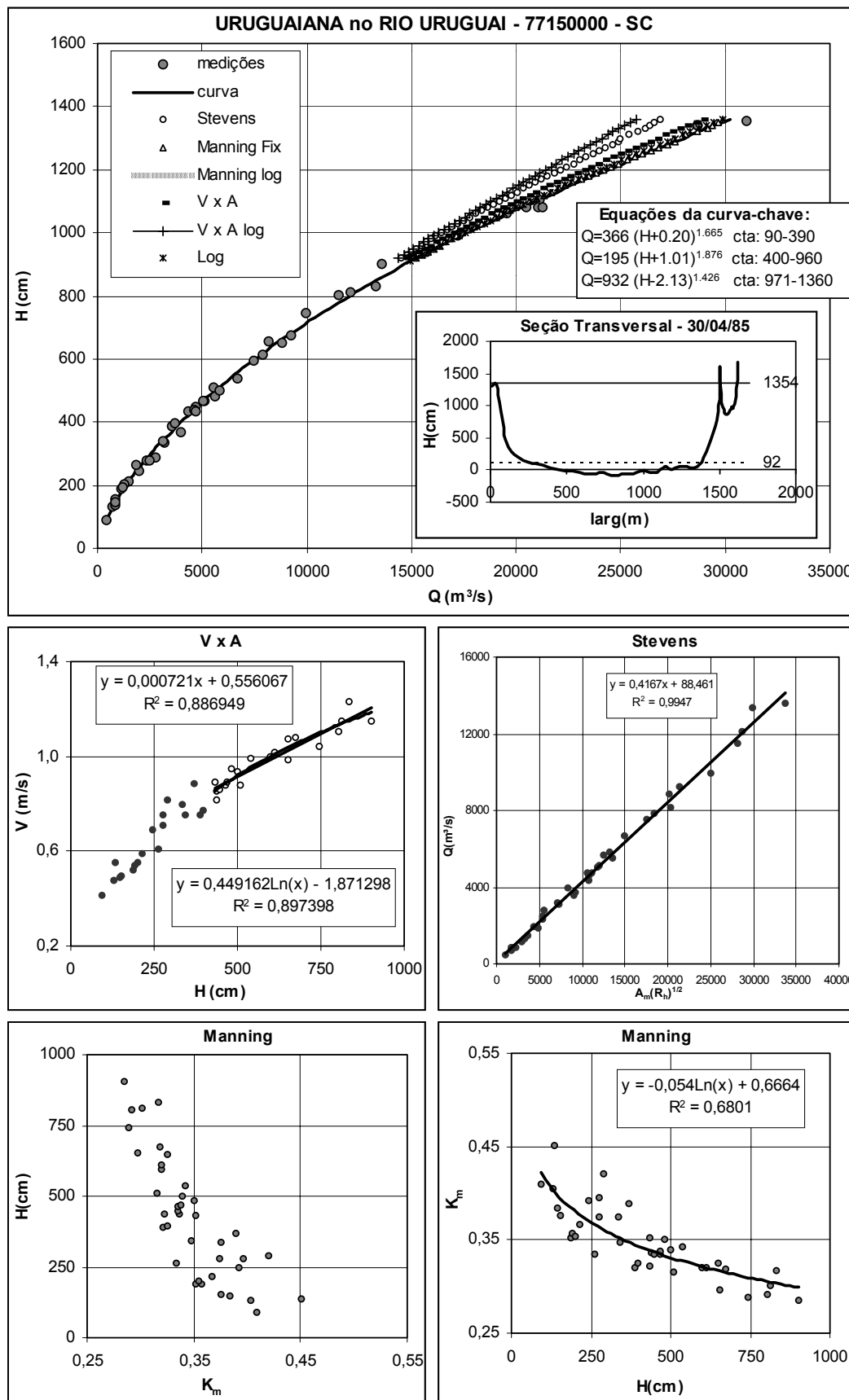


Figura D.59 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

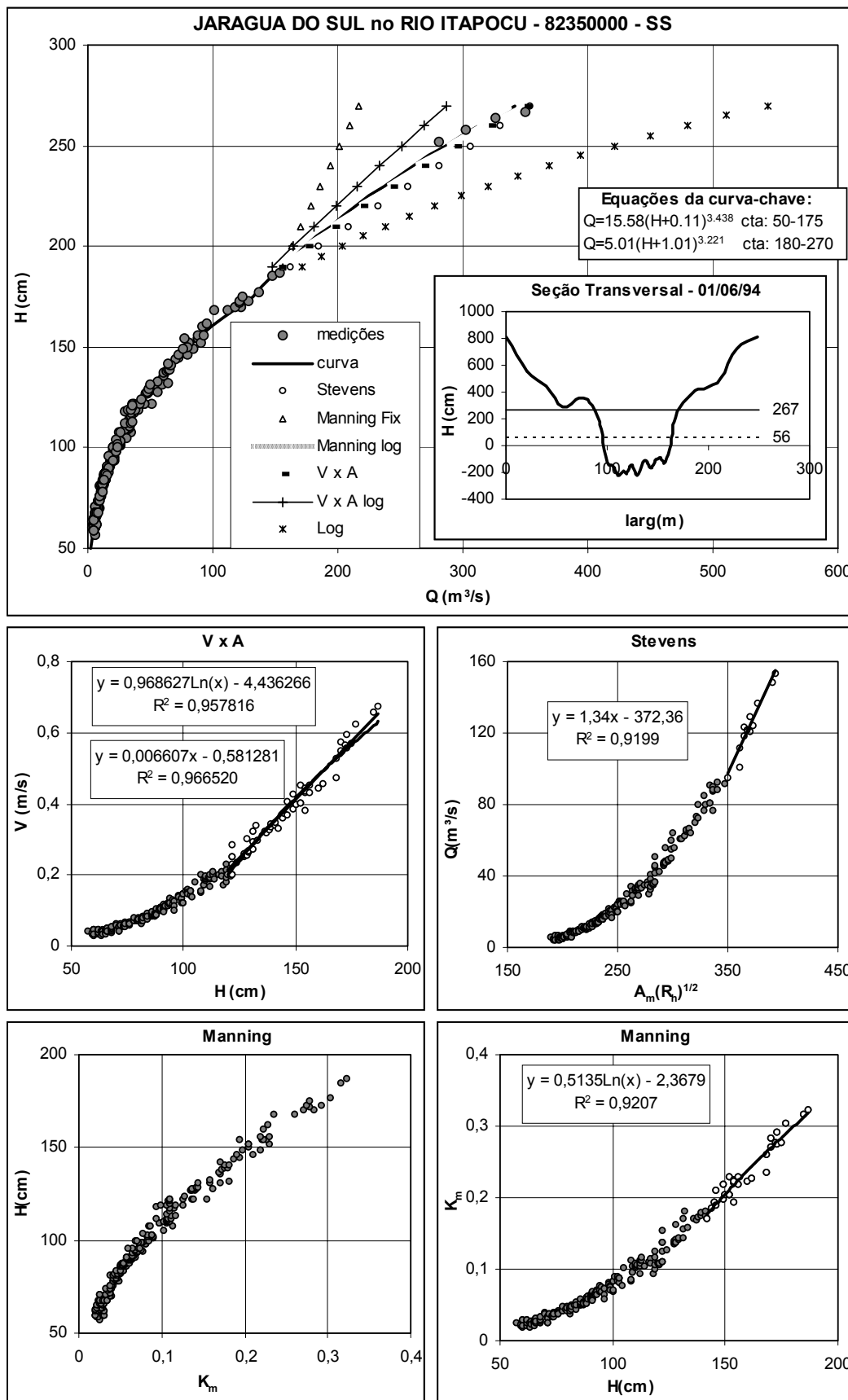


Figura D.60 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

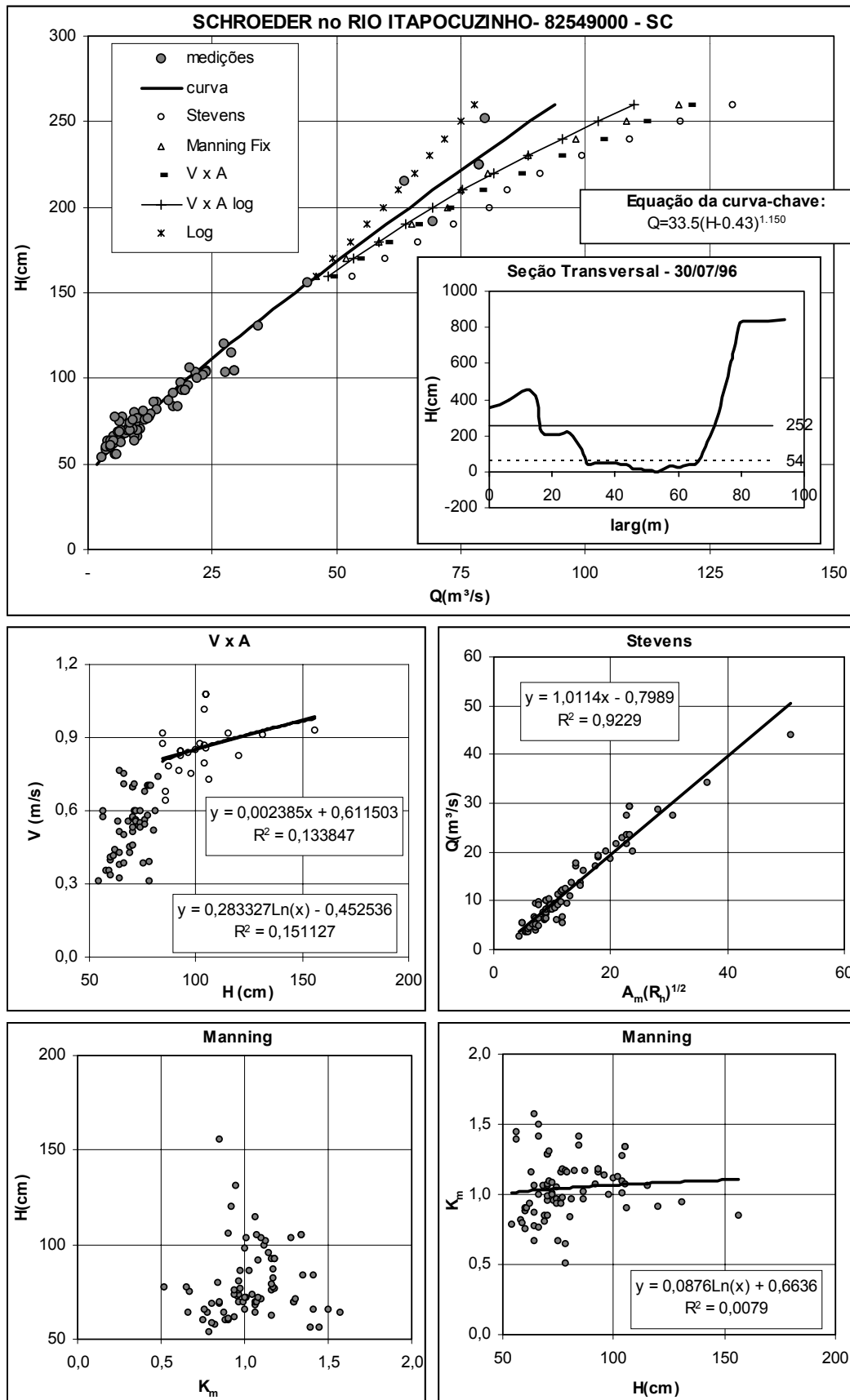


Figura D.61 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

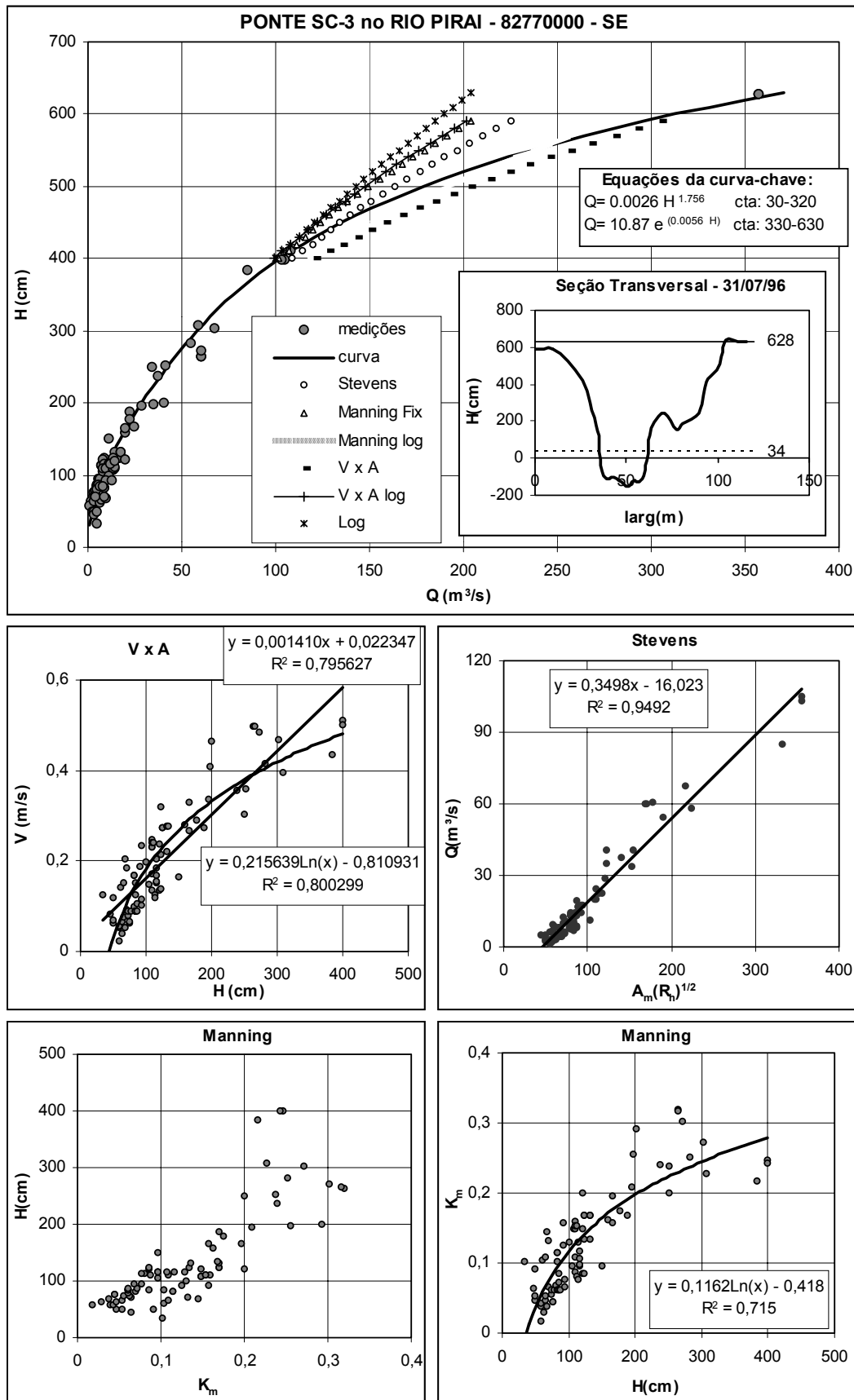


Figura D.62 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

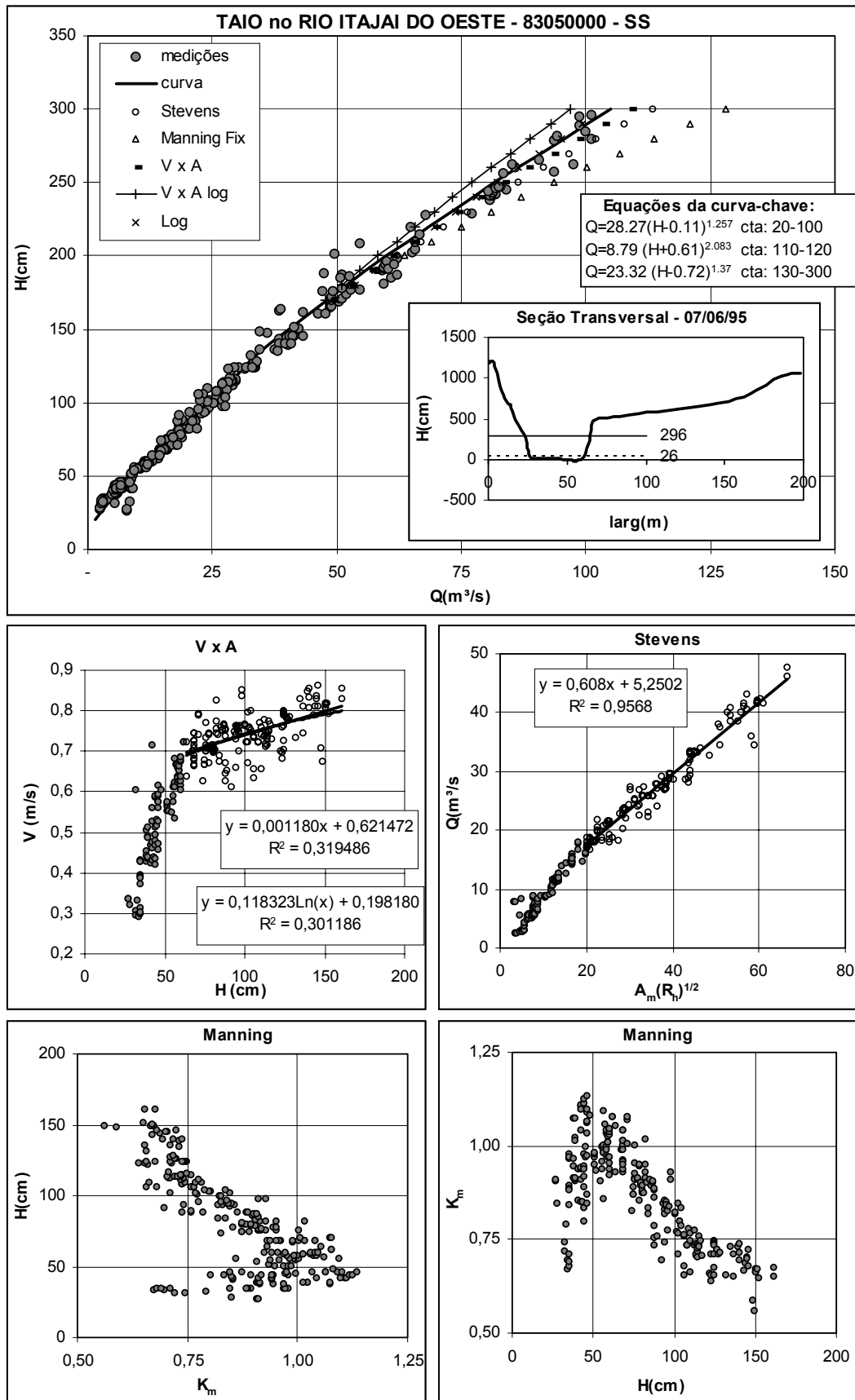


Figura D.63 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

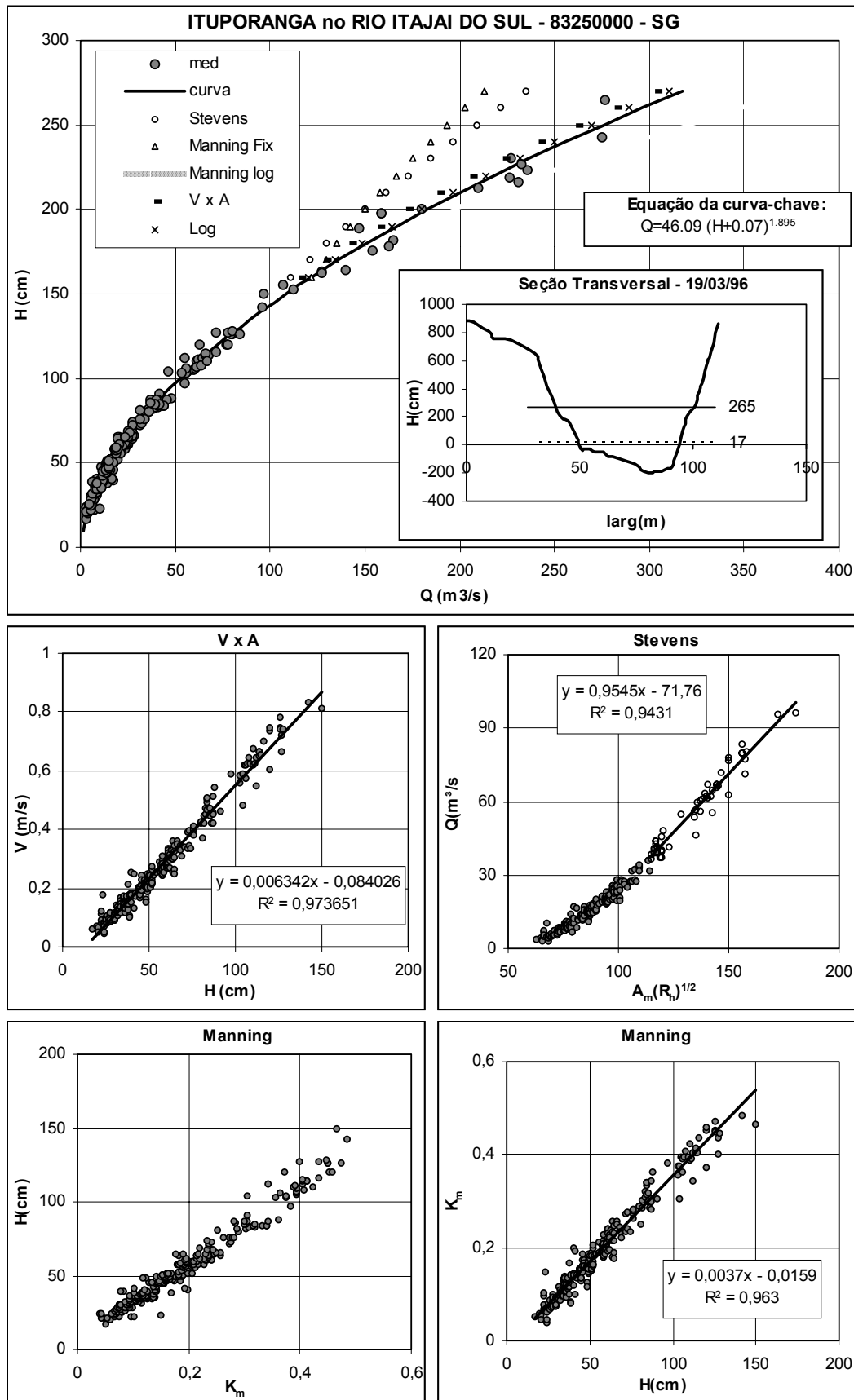


Figura D.64 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

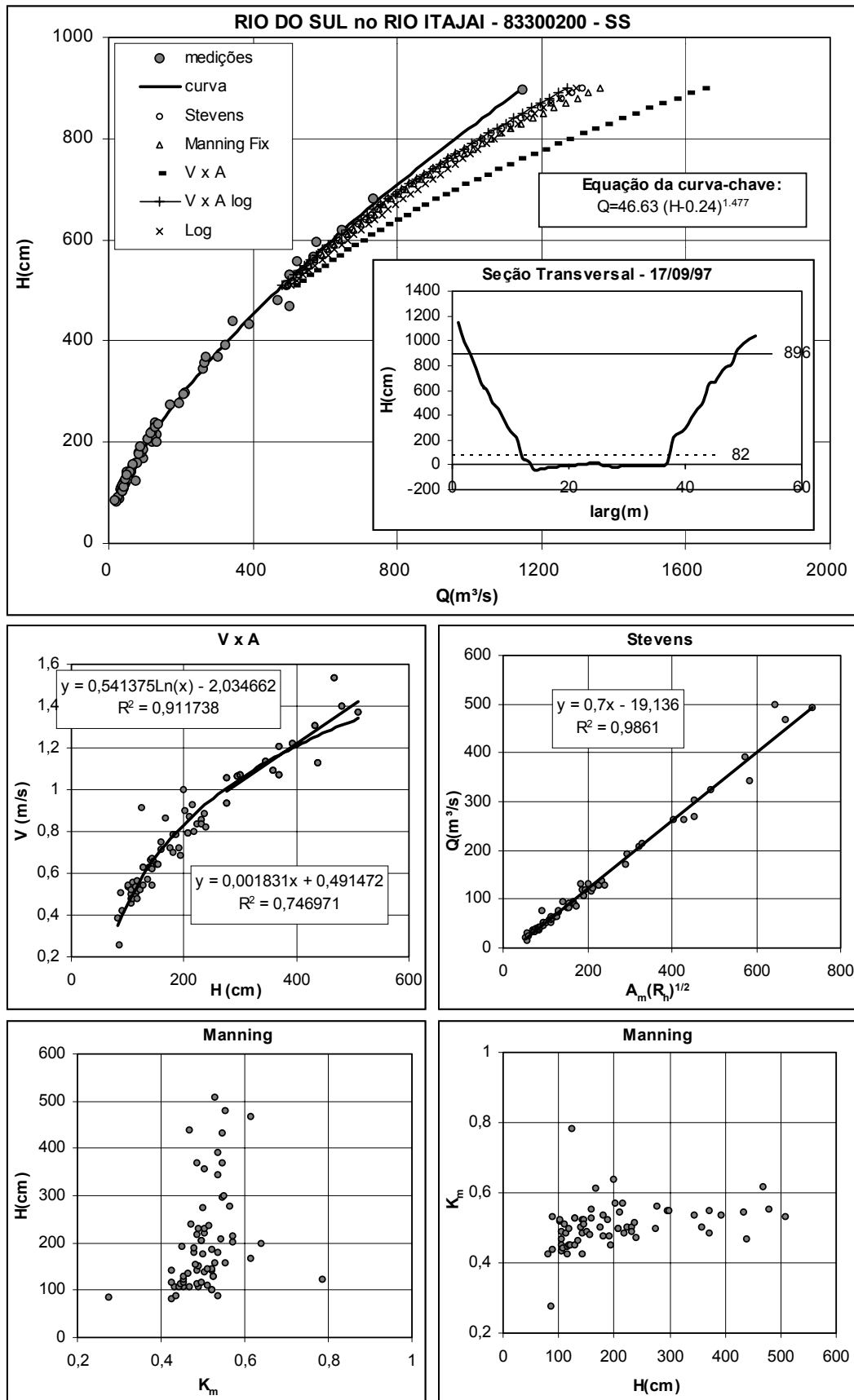


Figura D.65 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

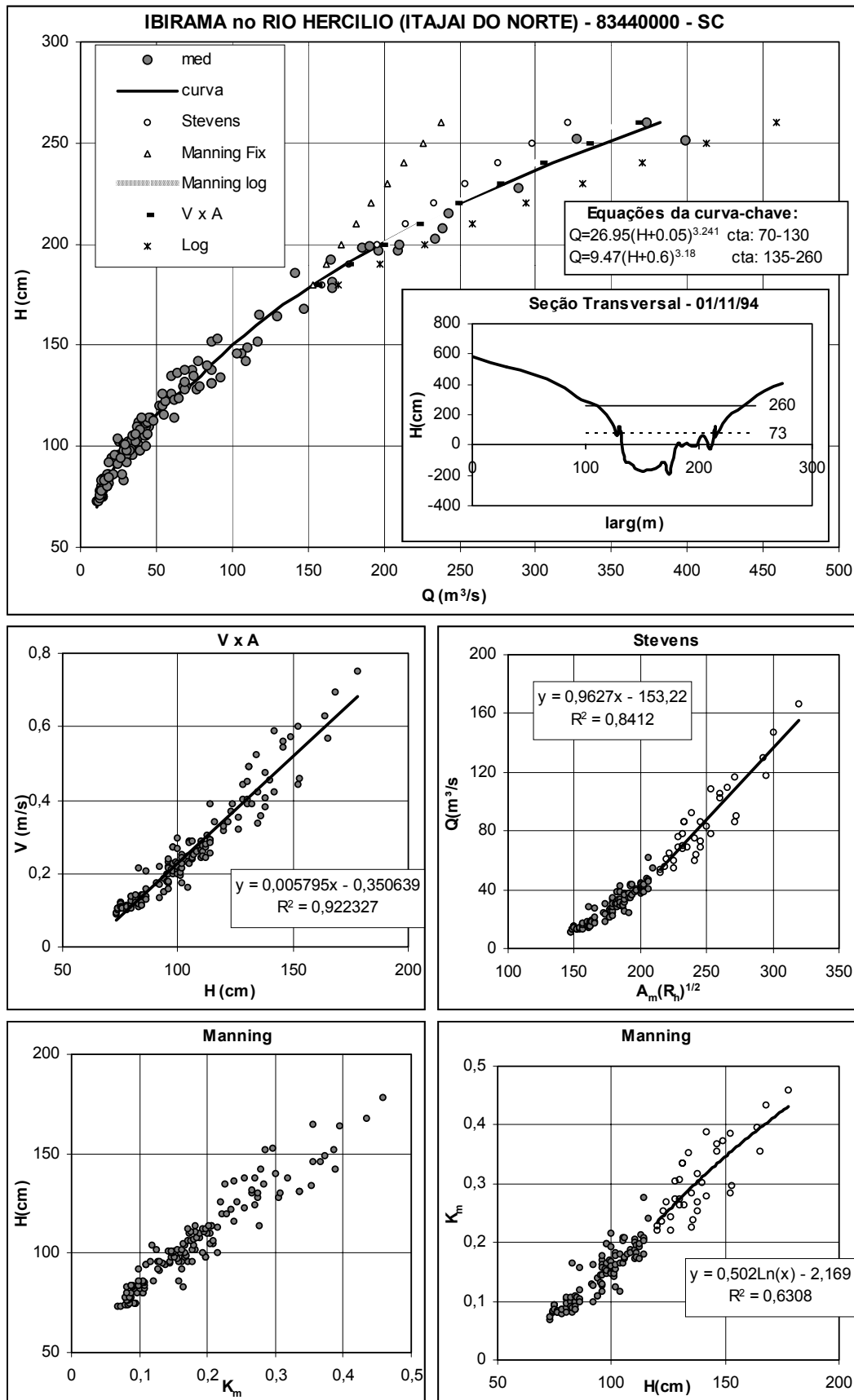


Figura D.66 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

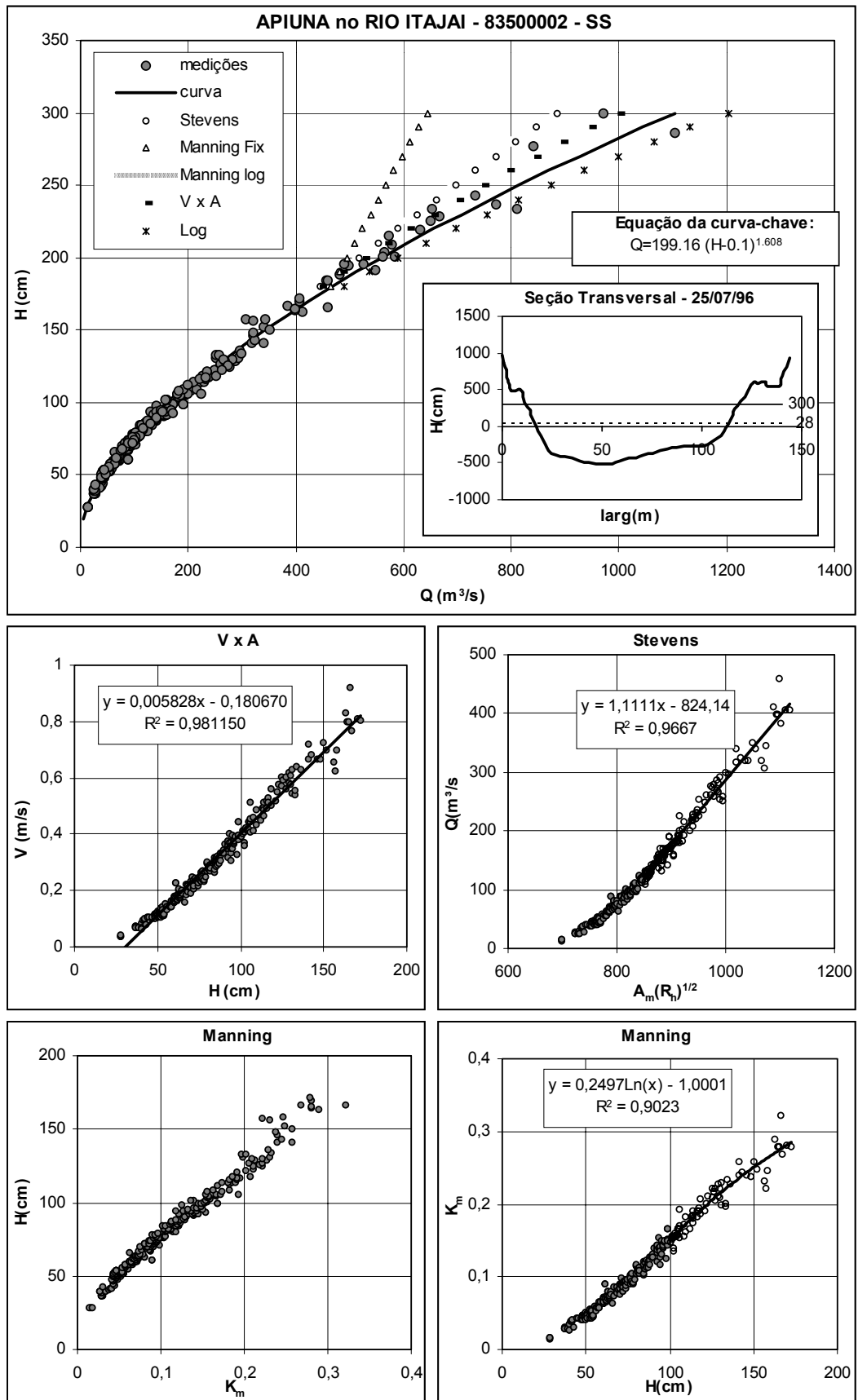


Figura D.67 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

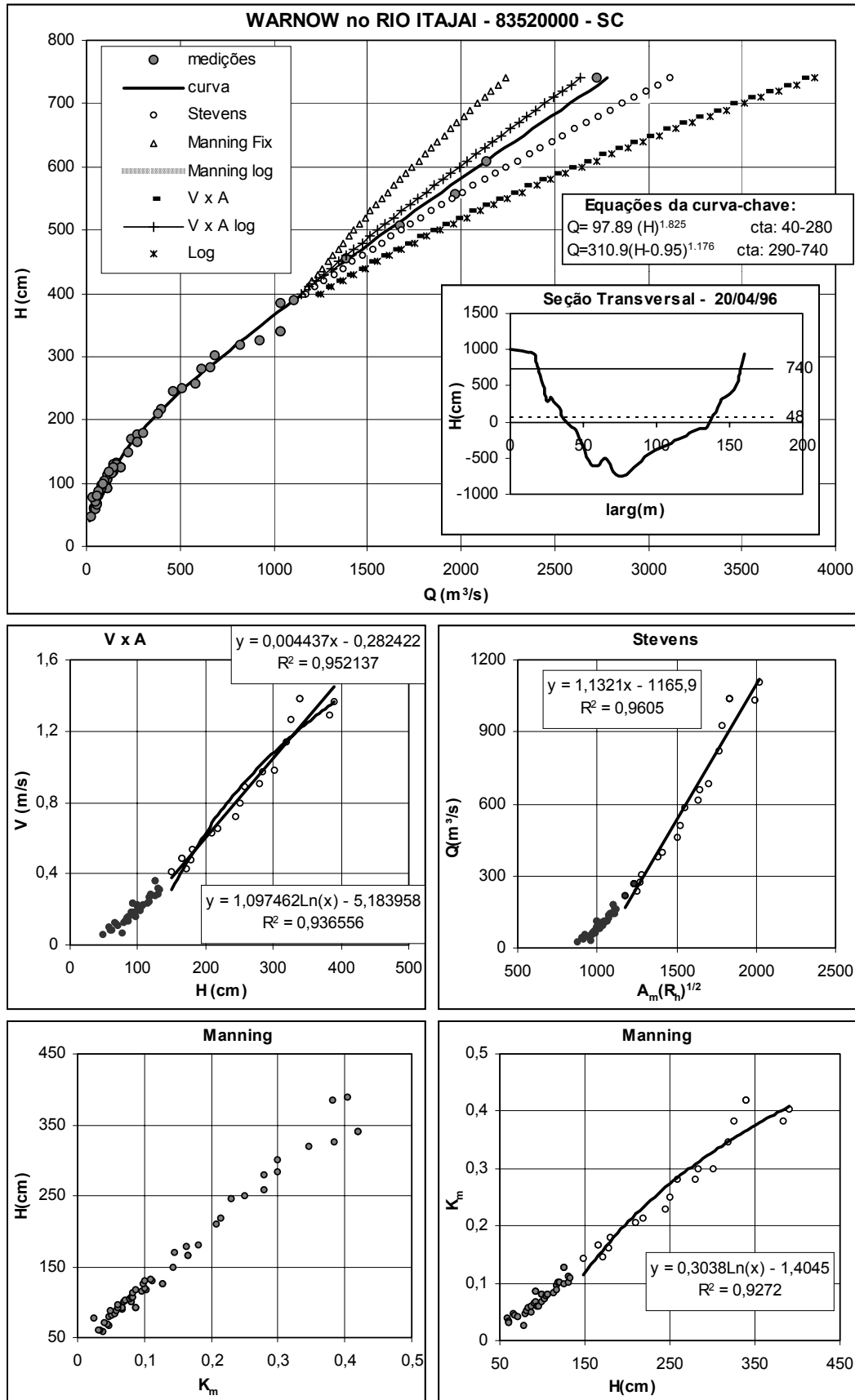


Figura D.68 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

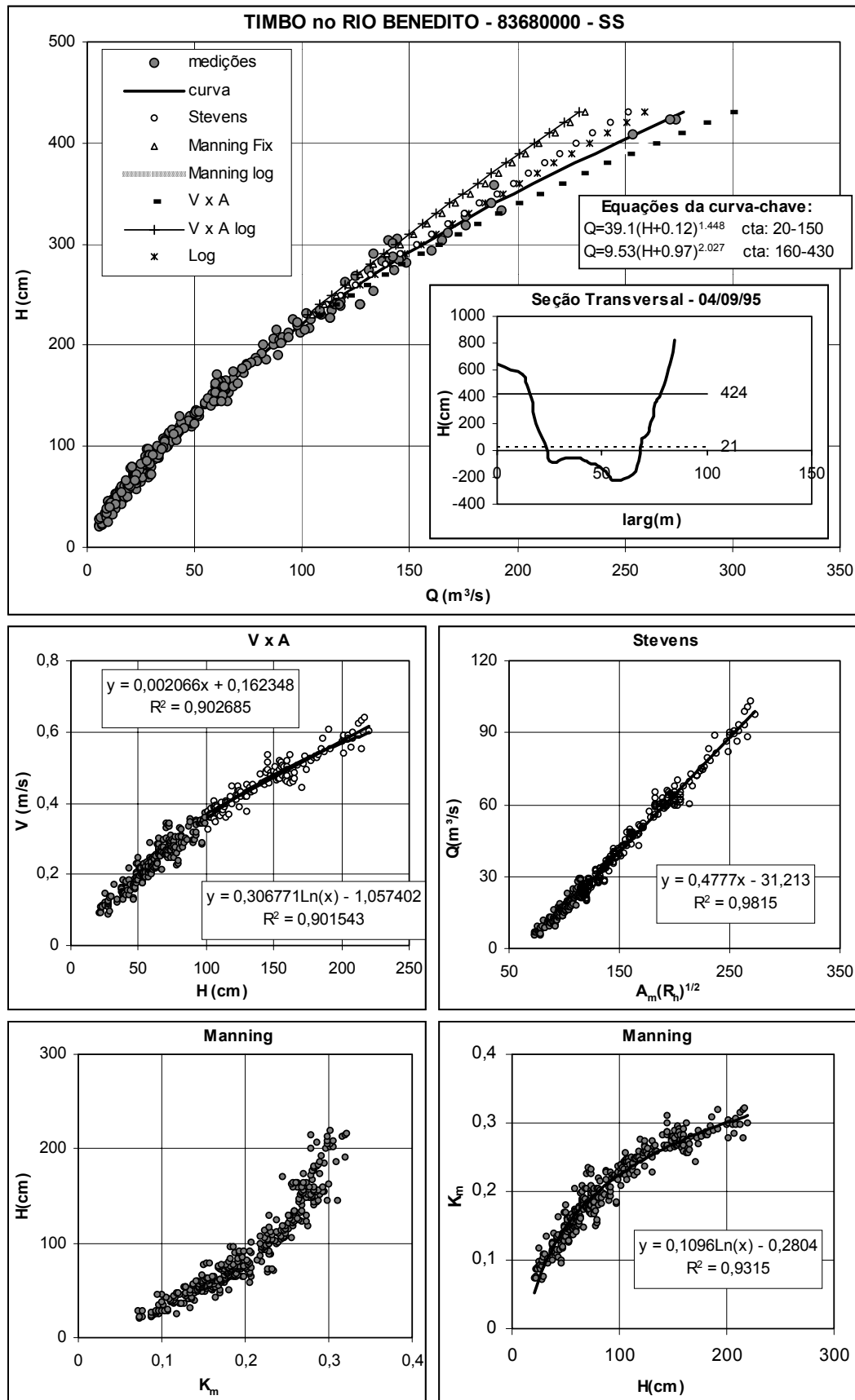


Figura D.69 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

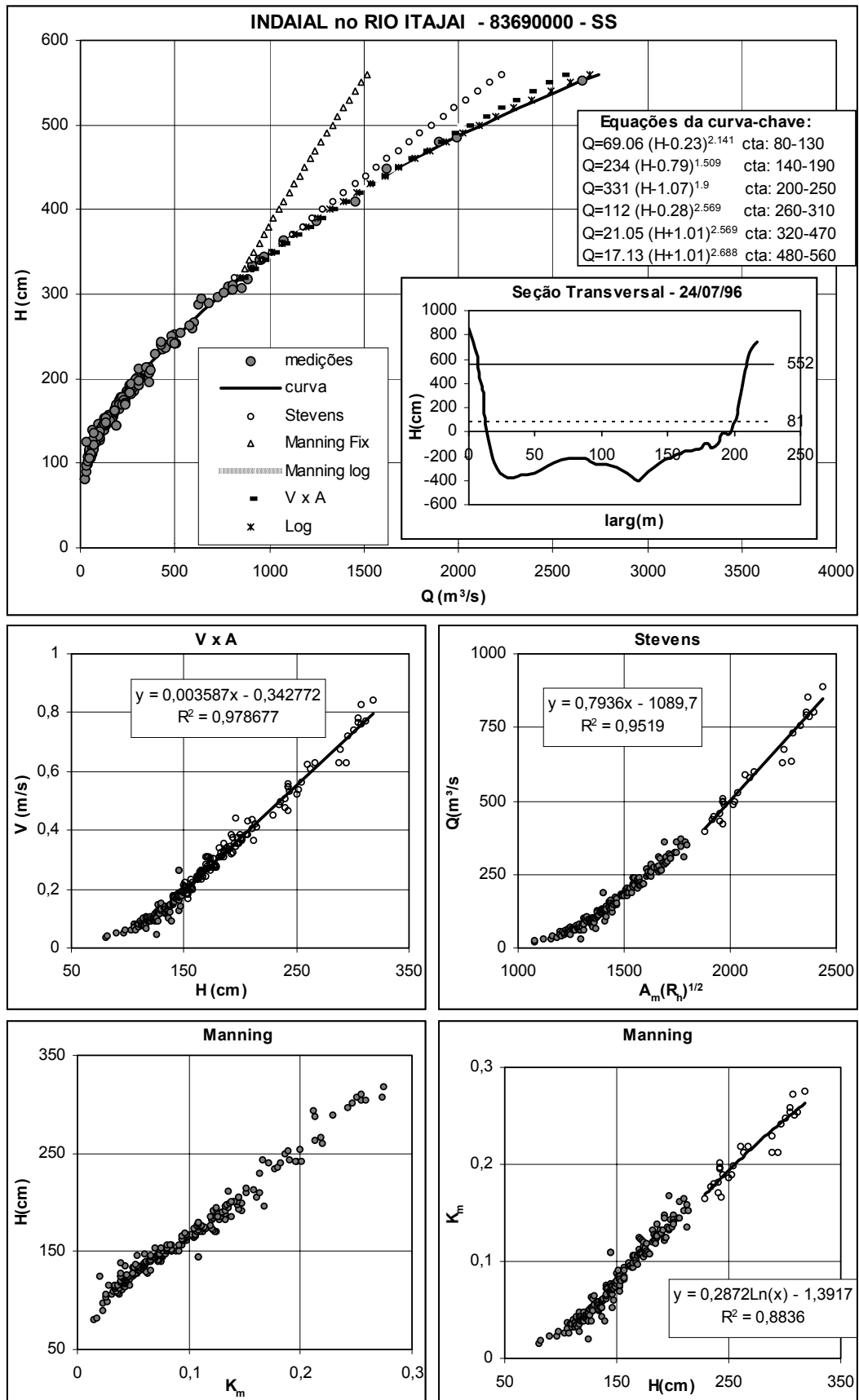


Figura D.70 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

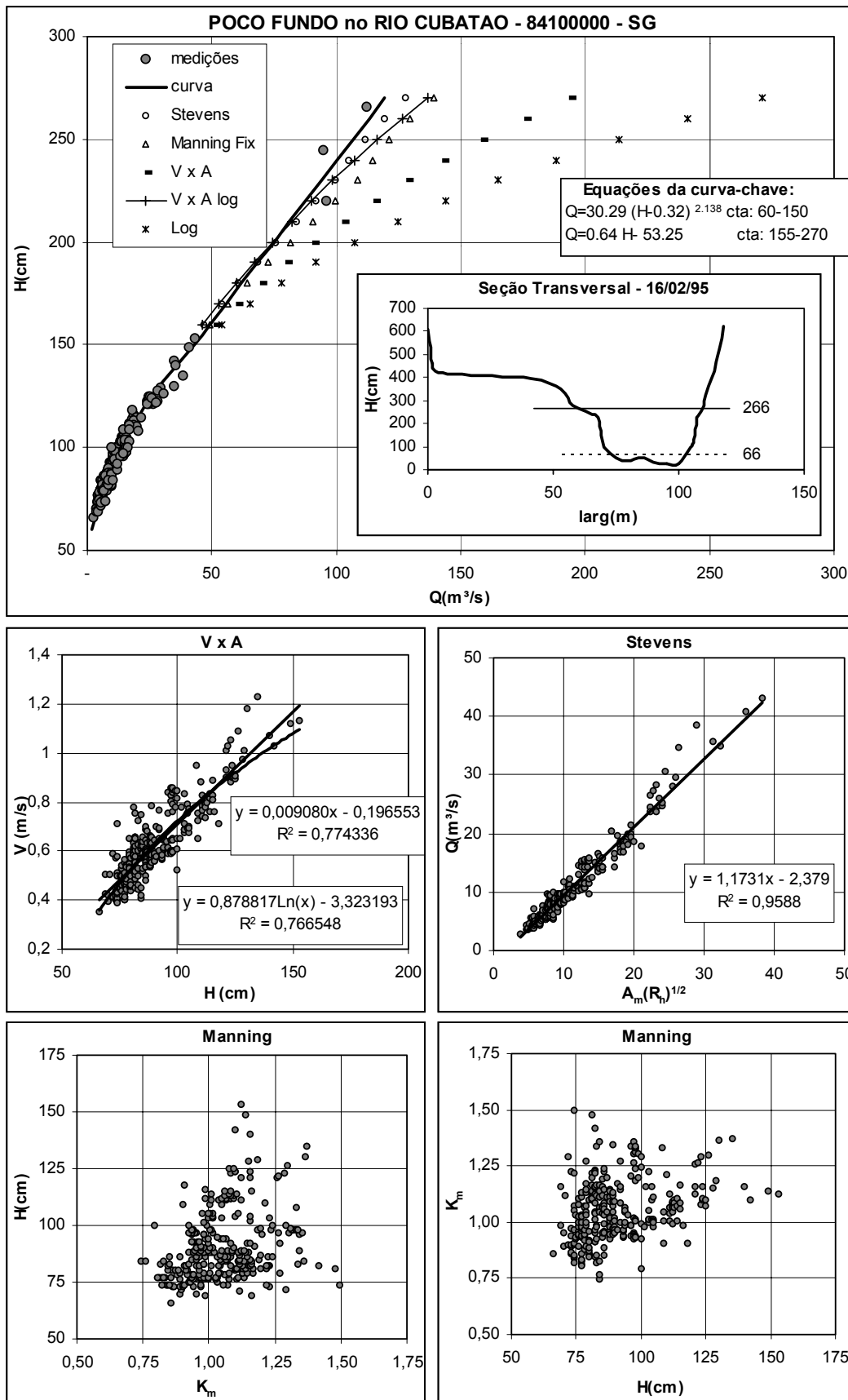


Figura D.71 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

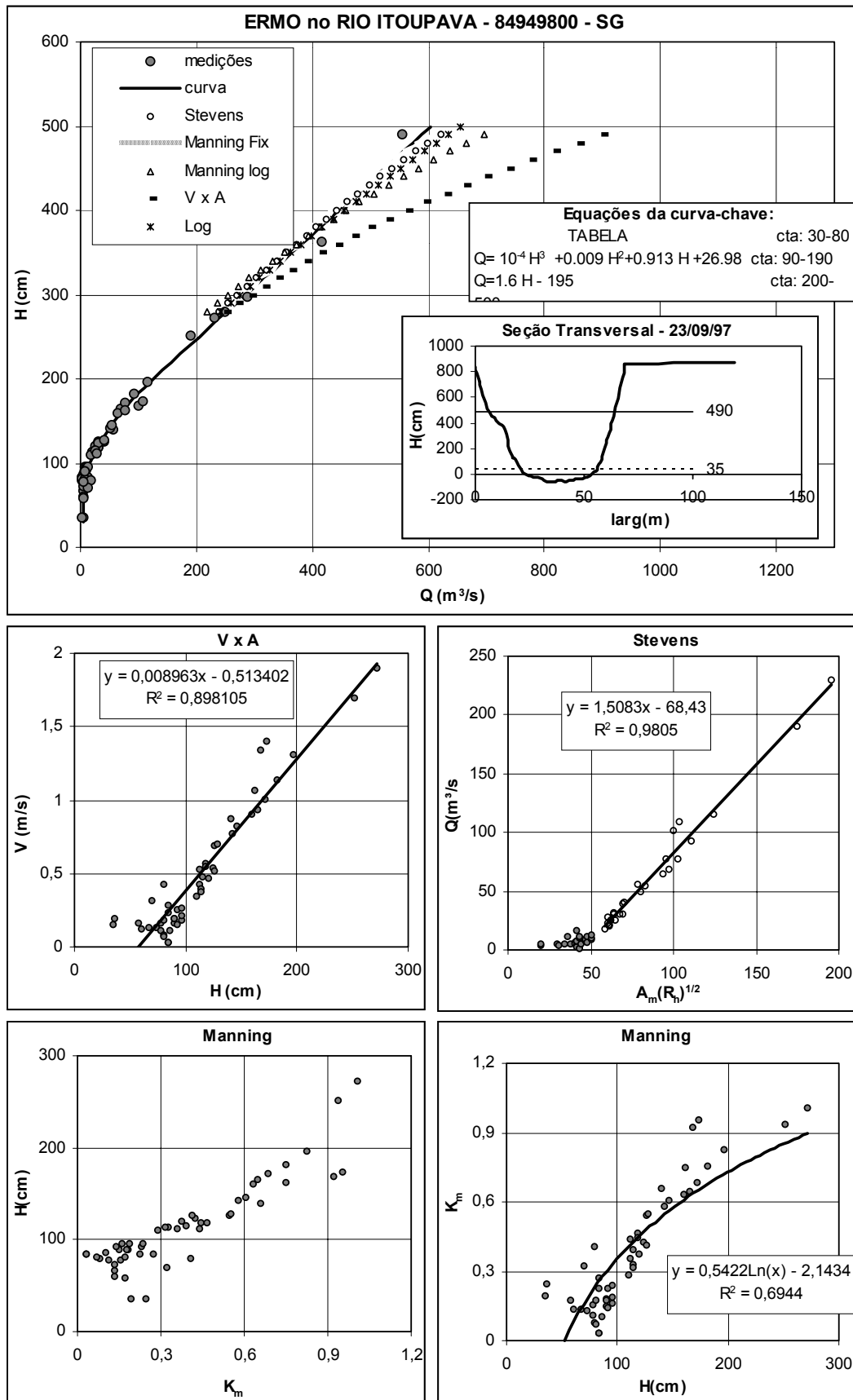


Figura D.72 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

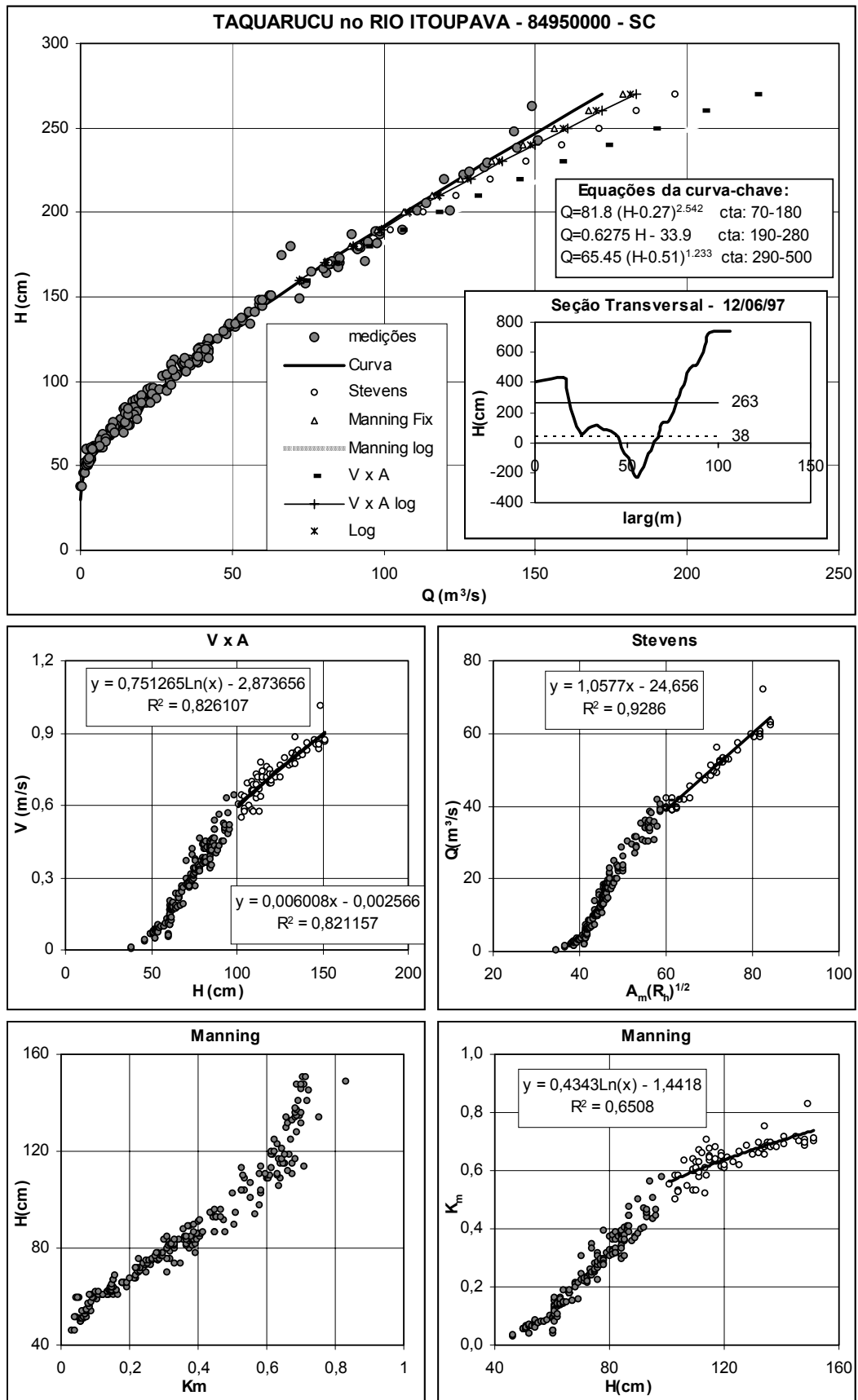


Figura D.73 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

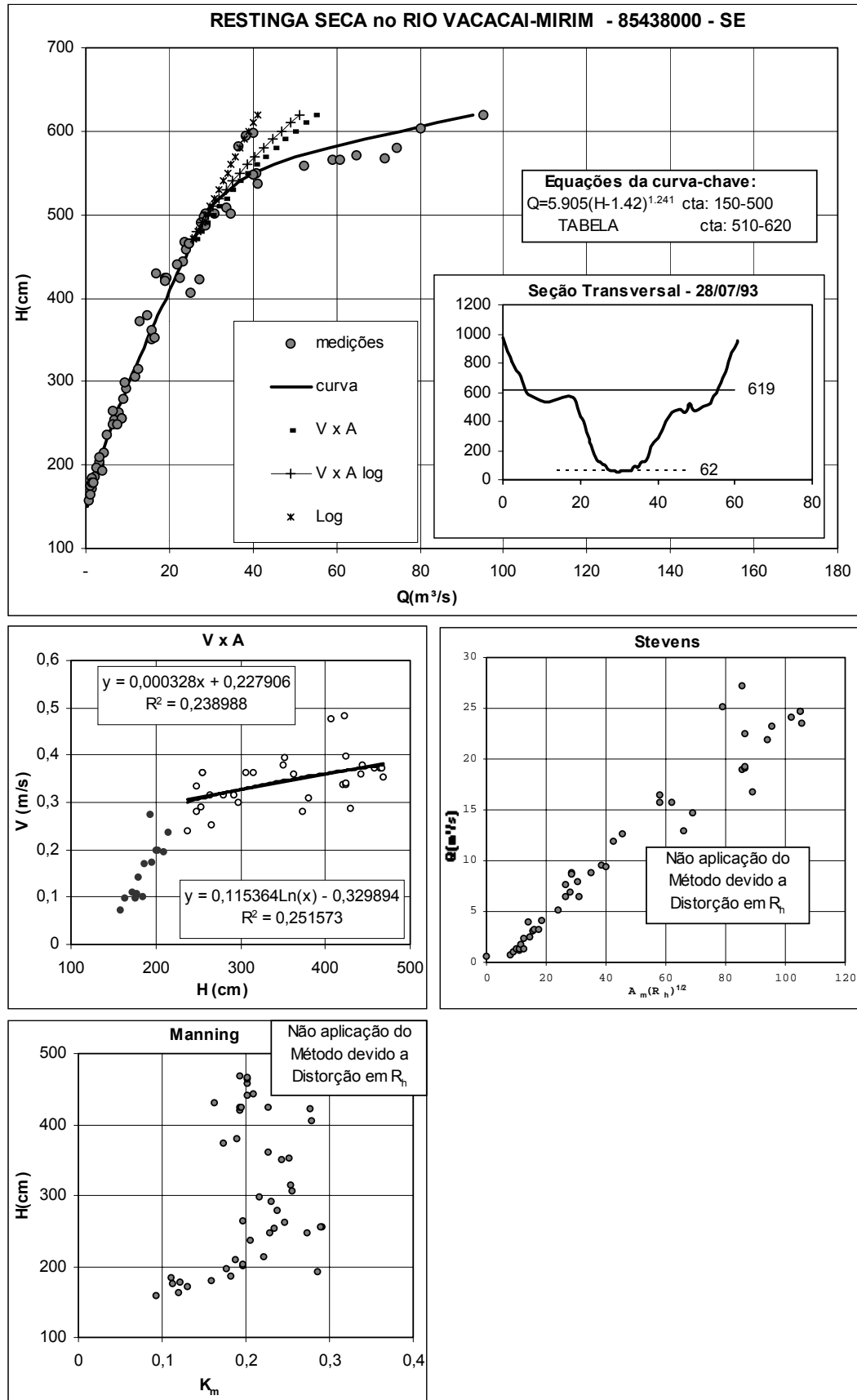


Figura D.74 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

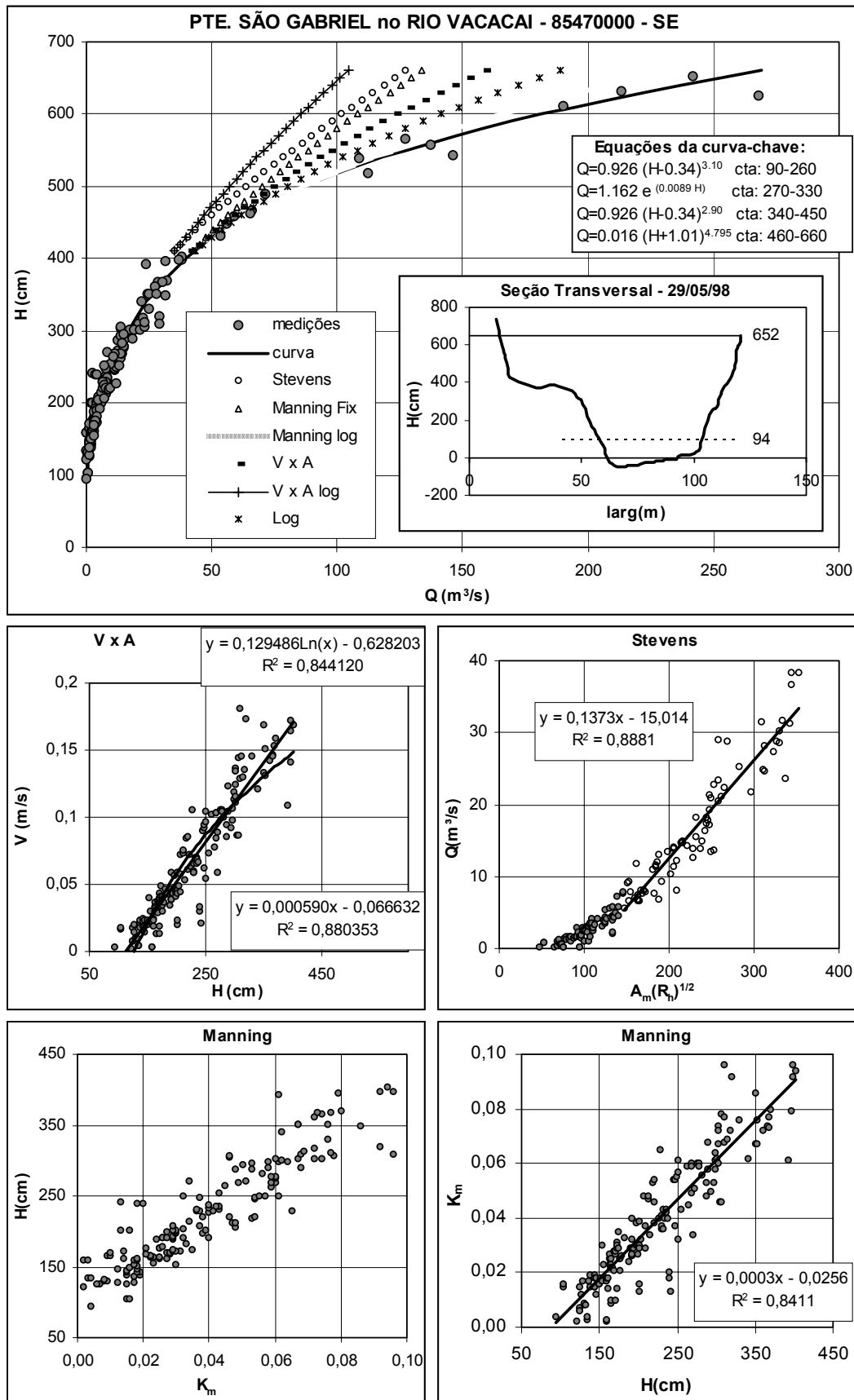


Figura D.75 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

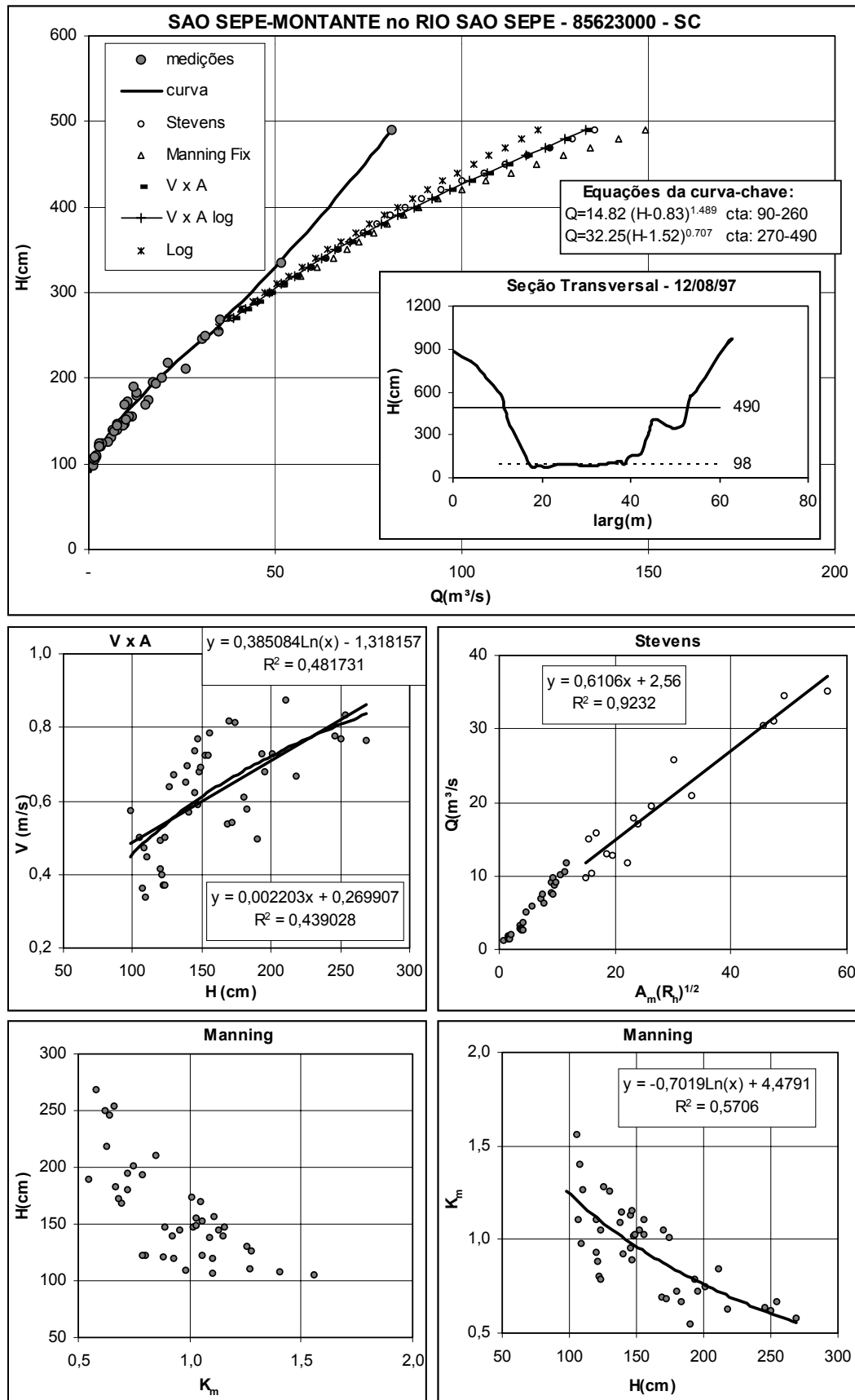


Figura D.76 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

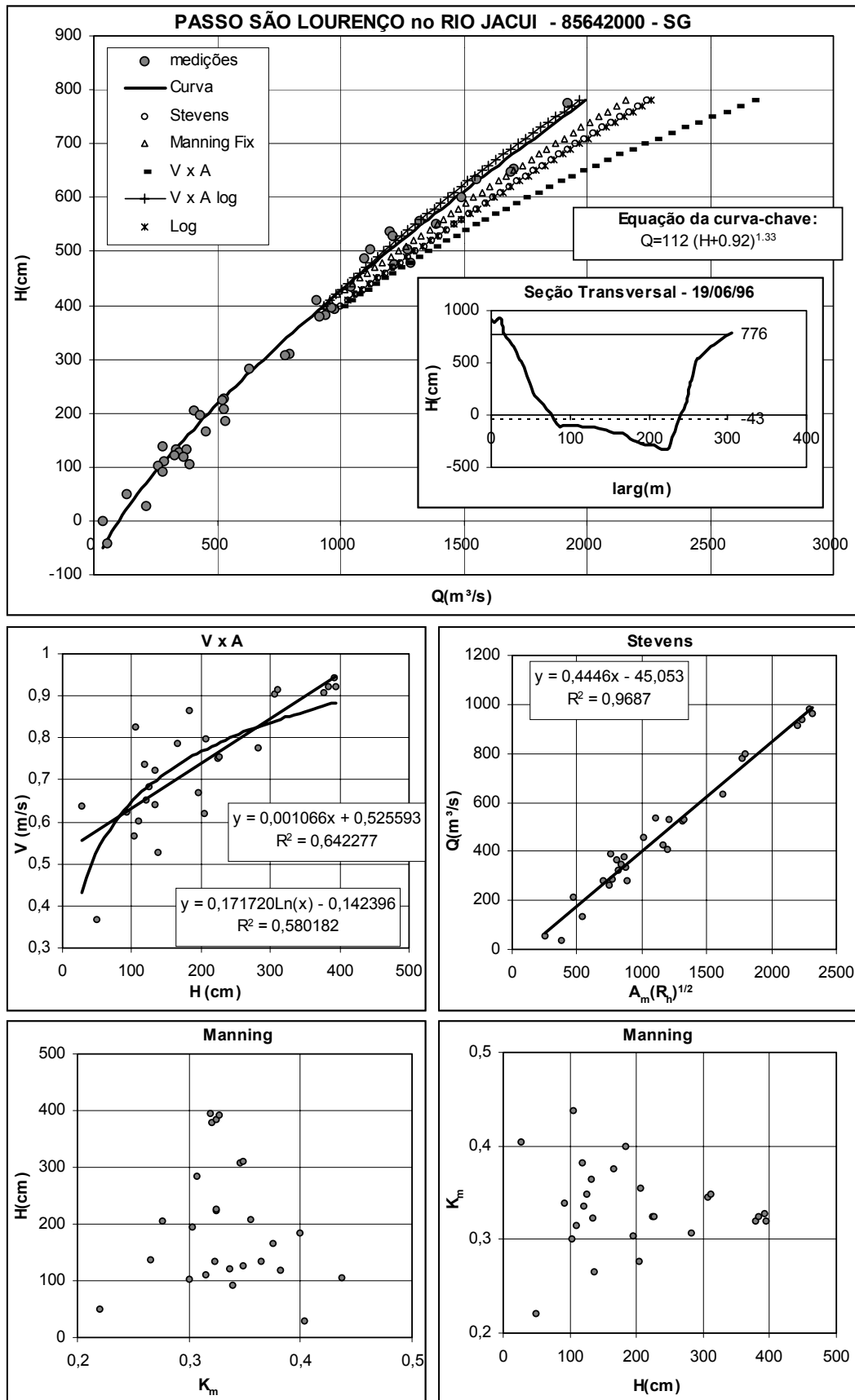


Figura D.77 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

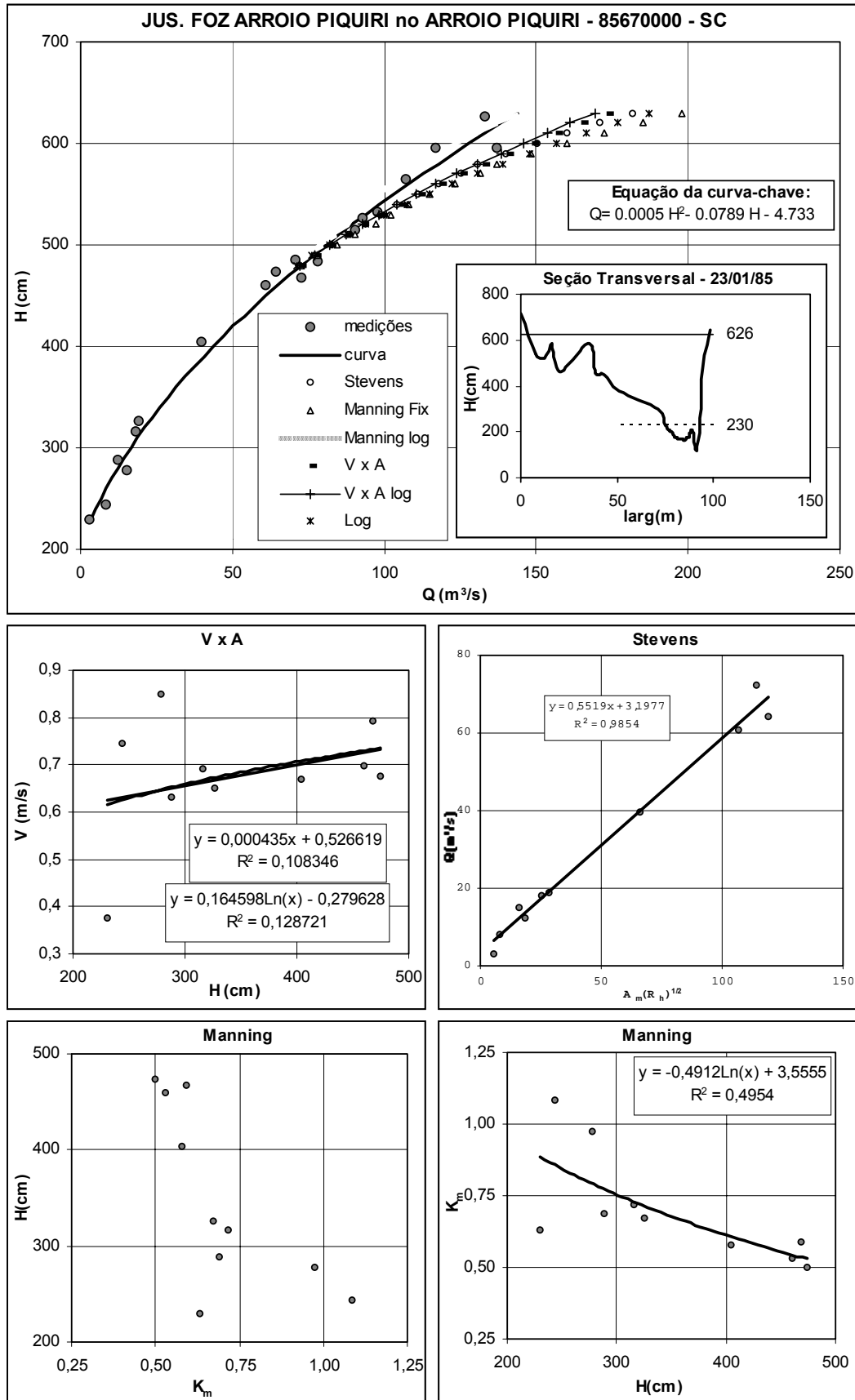


Figura D.78 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

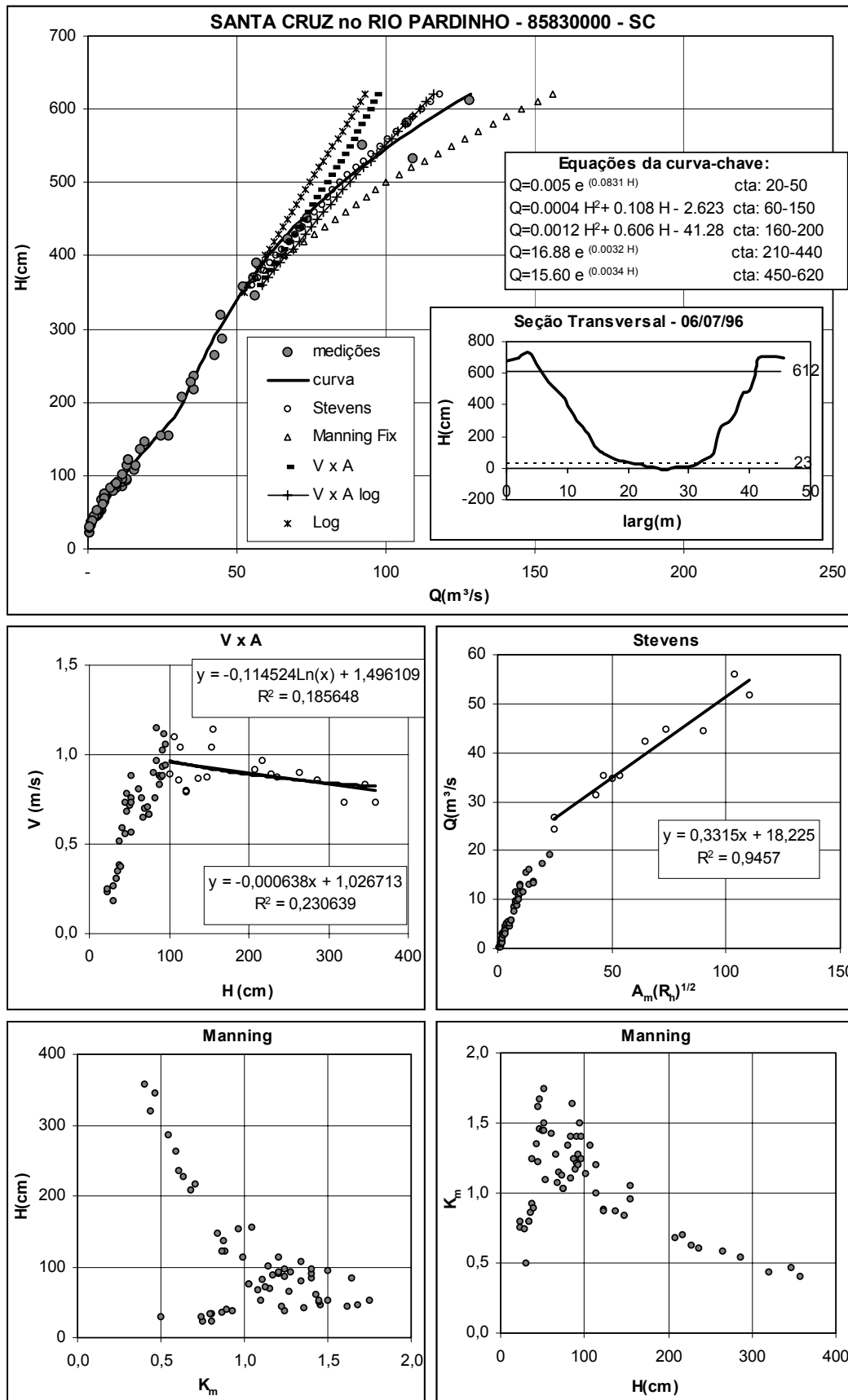


Figura D.79 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

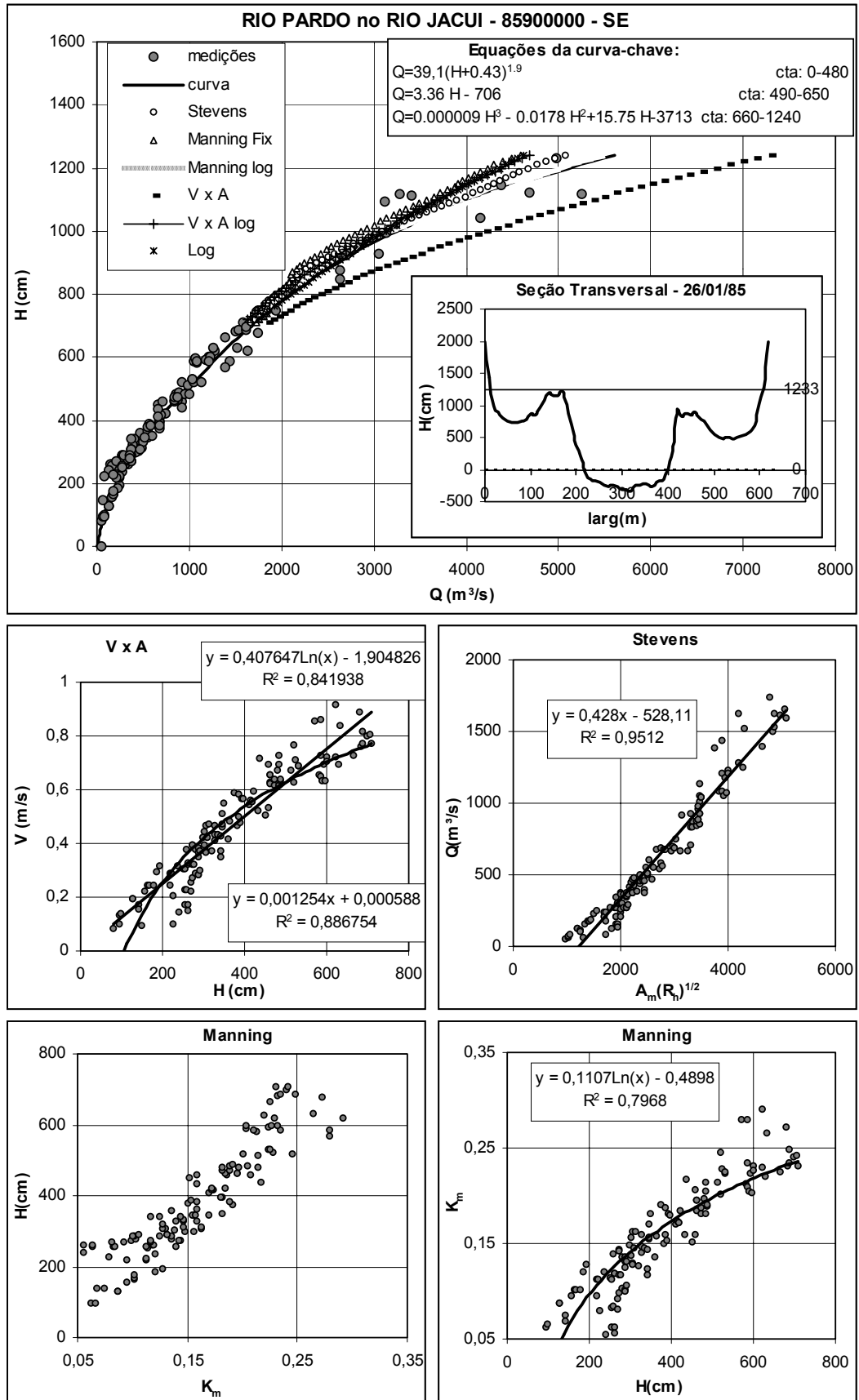


Figura D.80 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

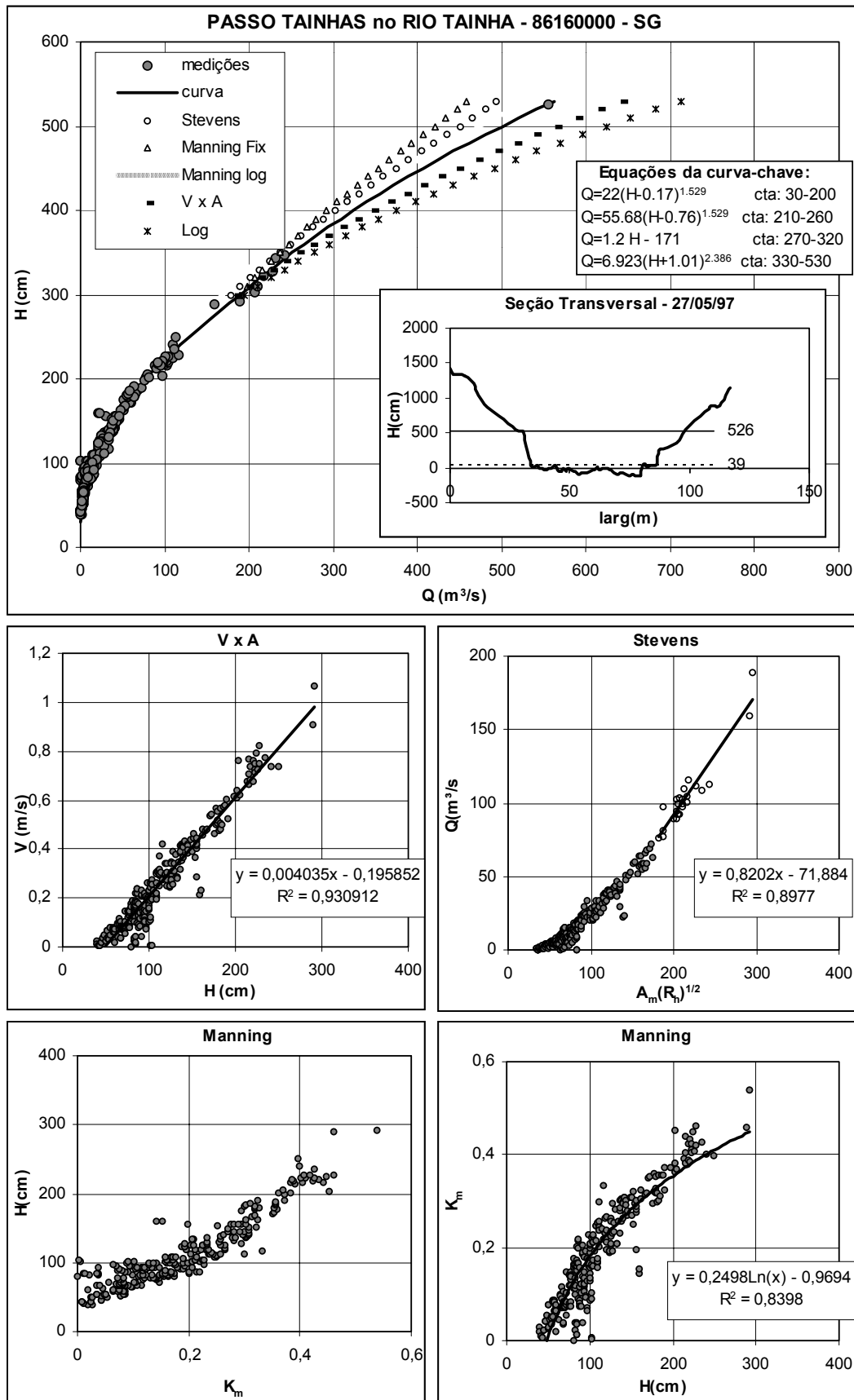


Figura D.81 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

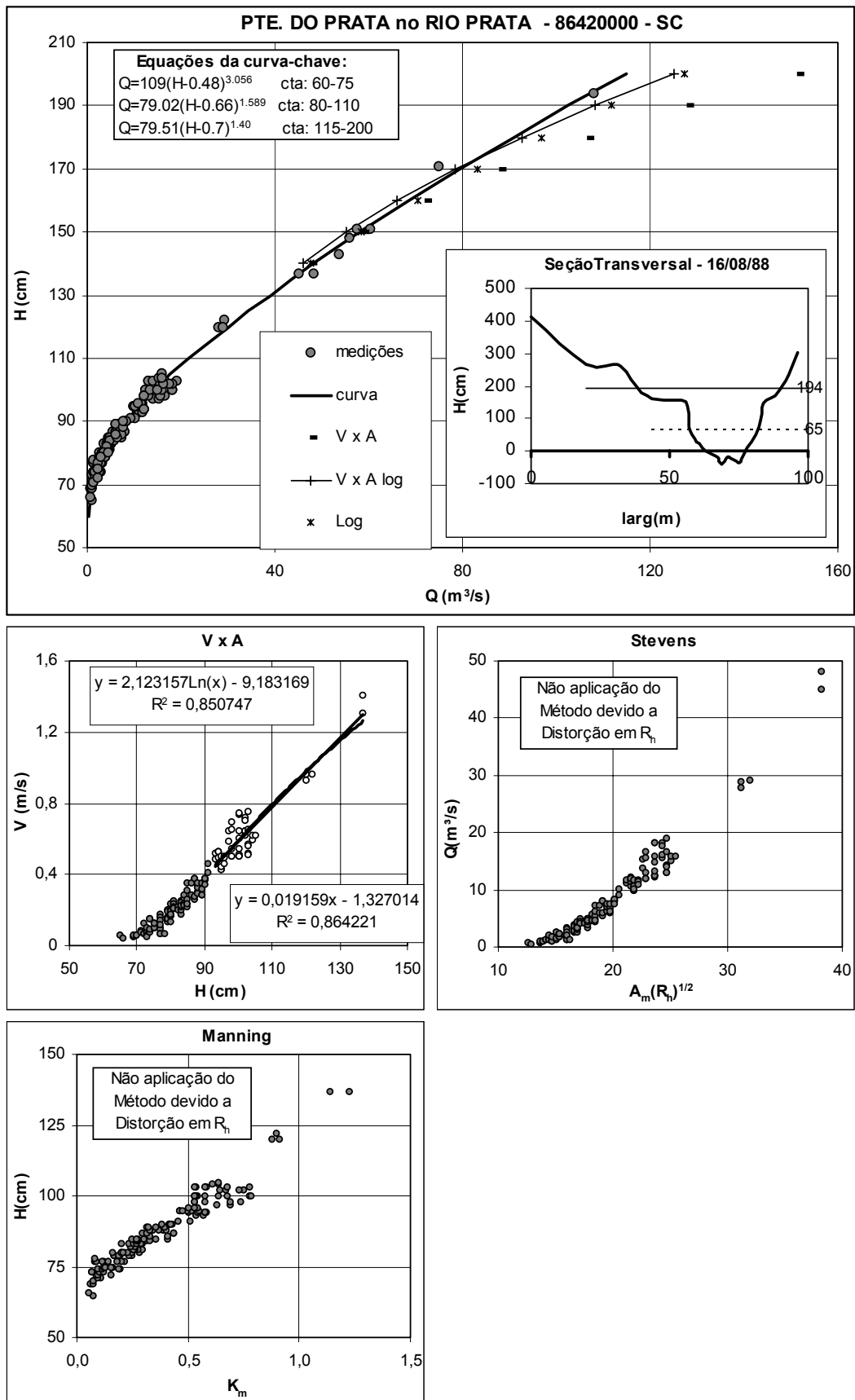


Figura D.82 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

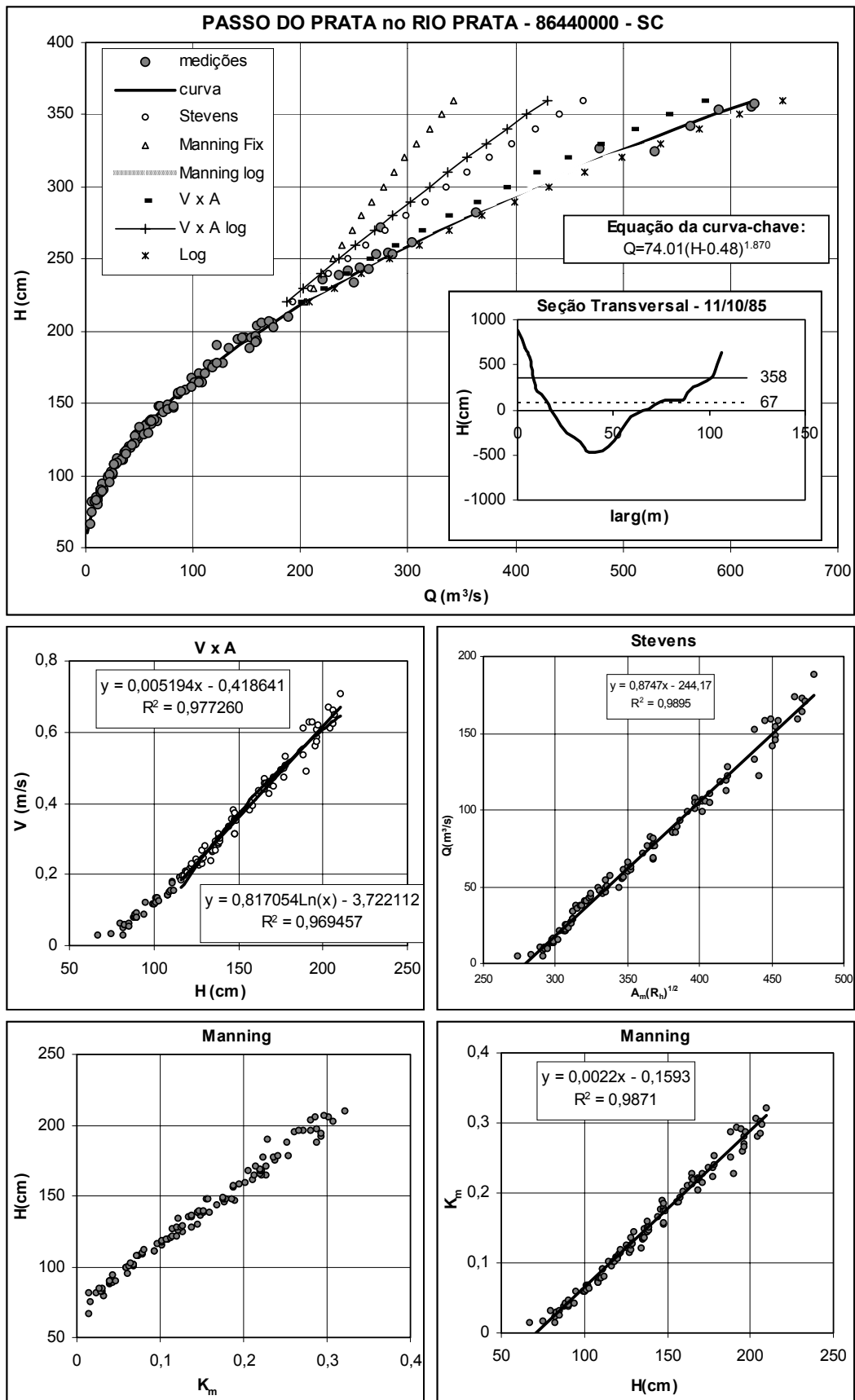


Figura D.83 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

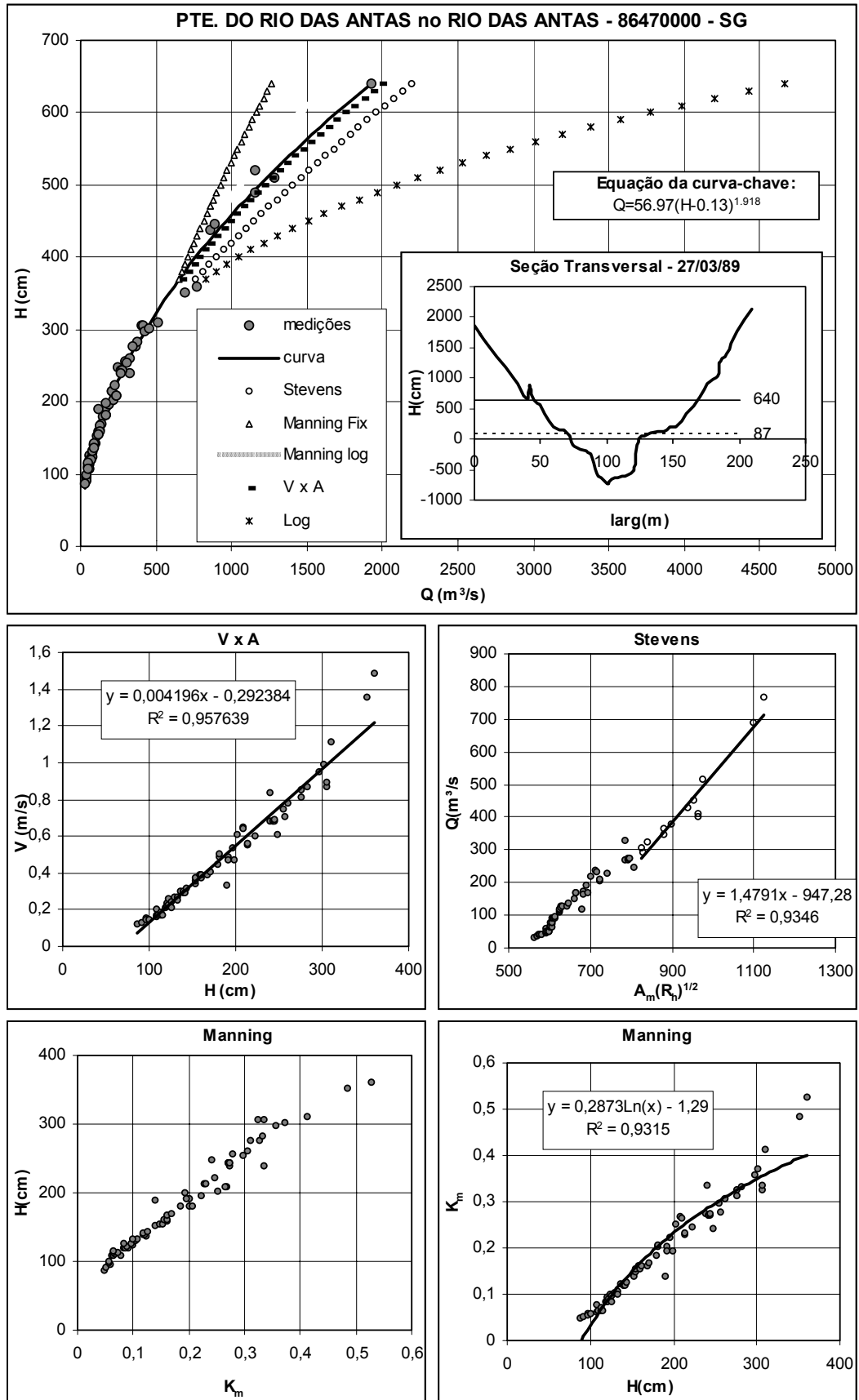


Figura D.84 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

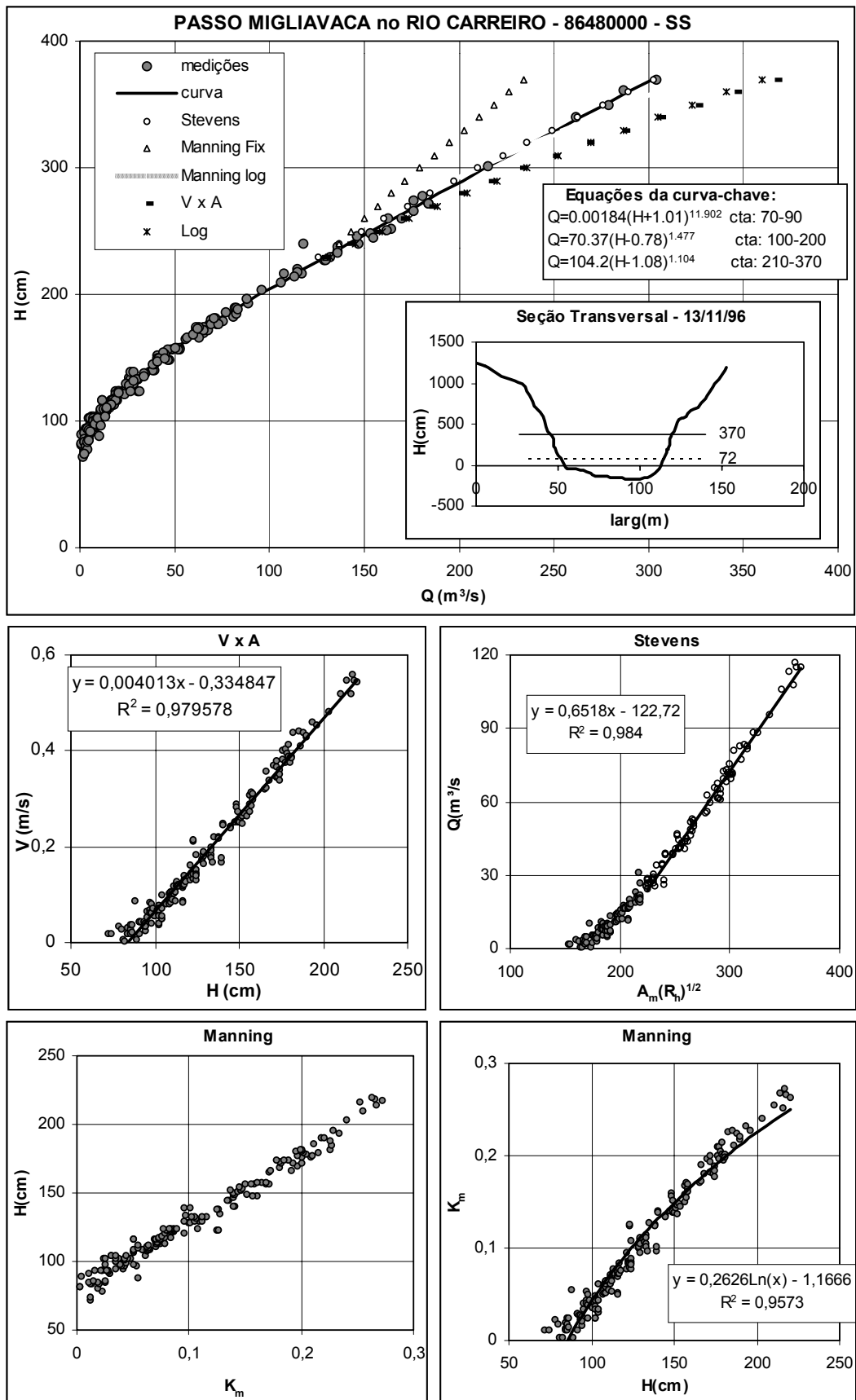


Figura D.85 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

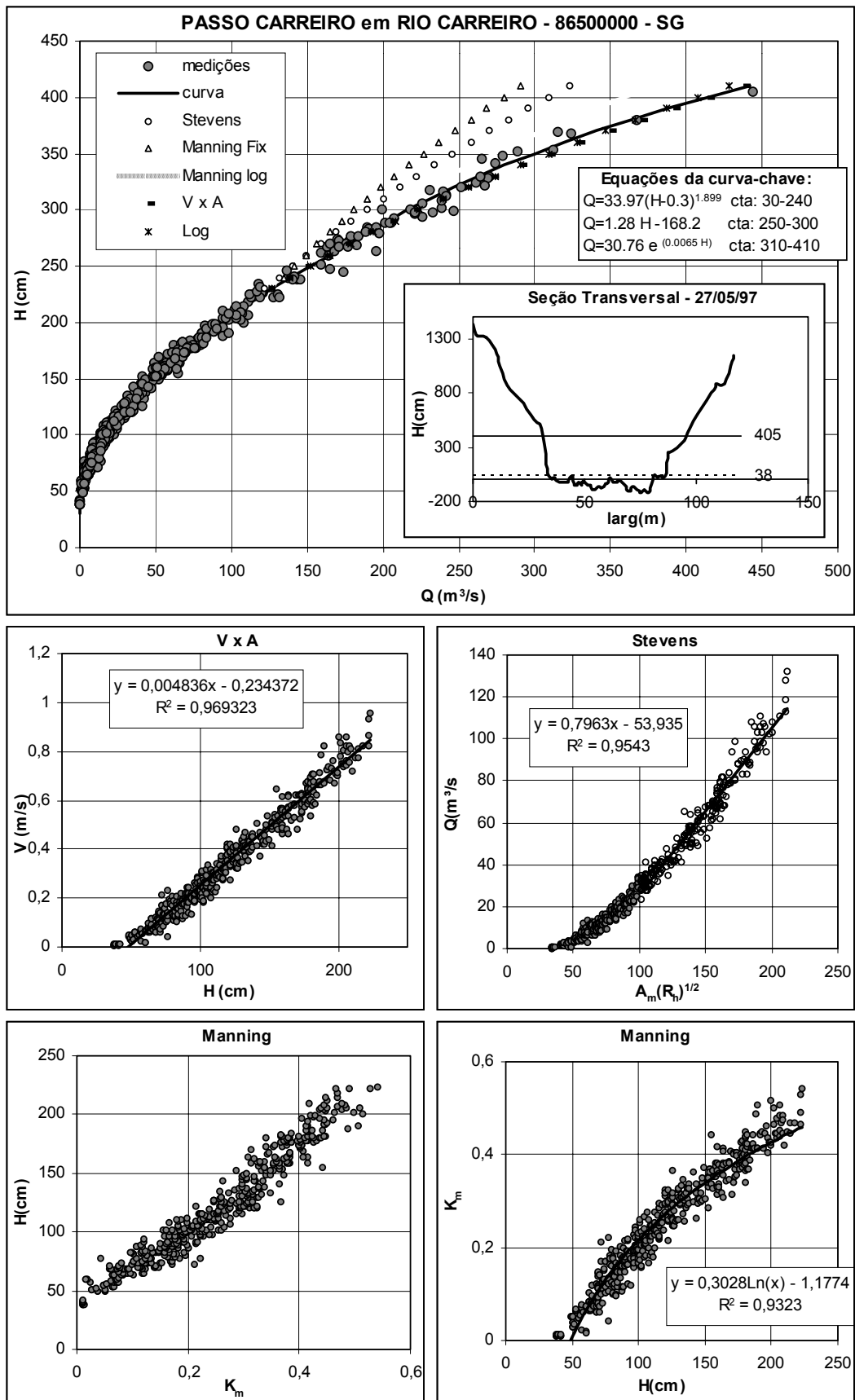


Figura D.86 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

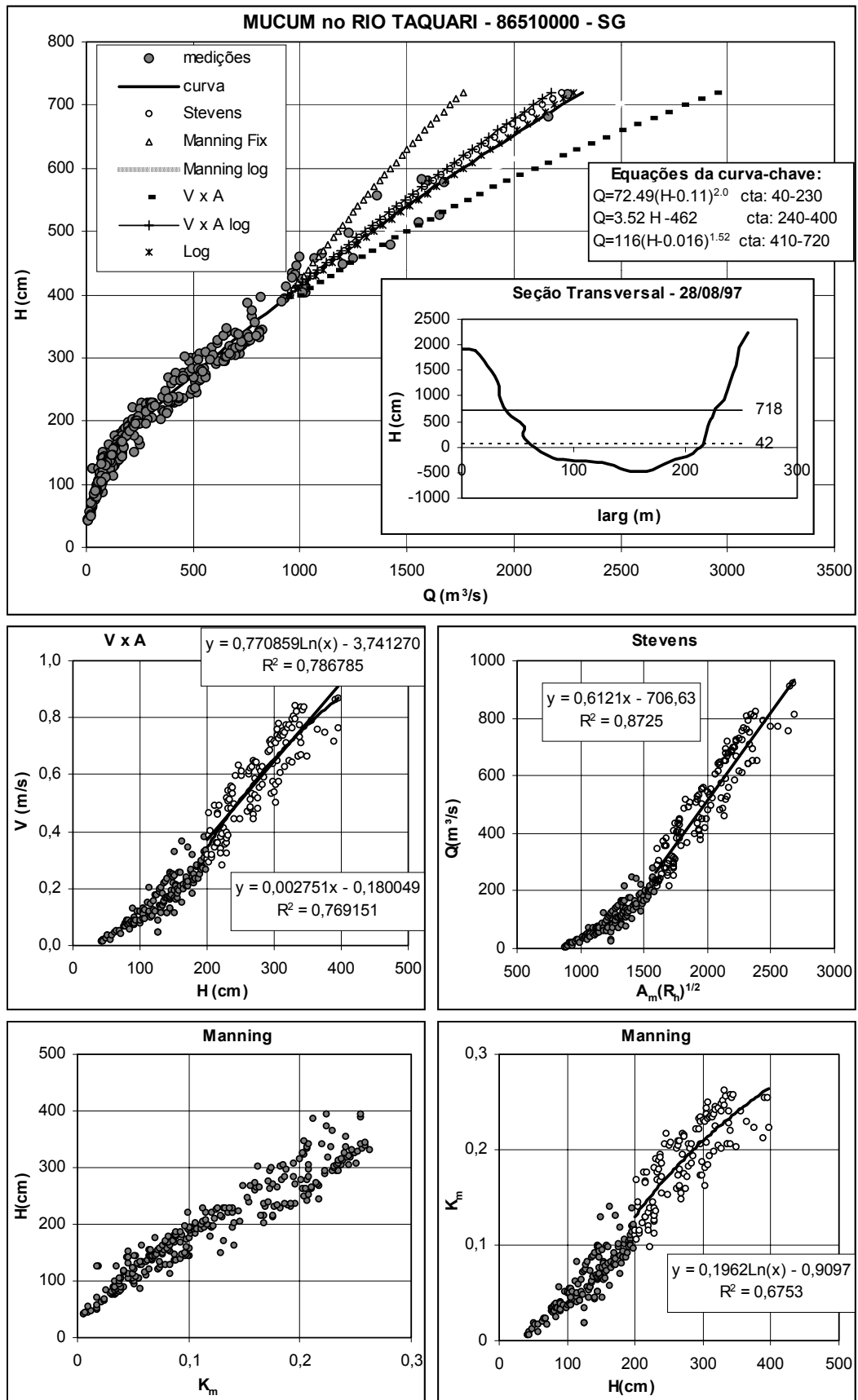


Figura D.87 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

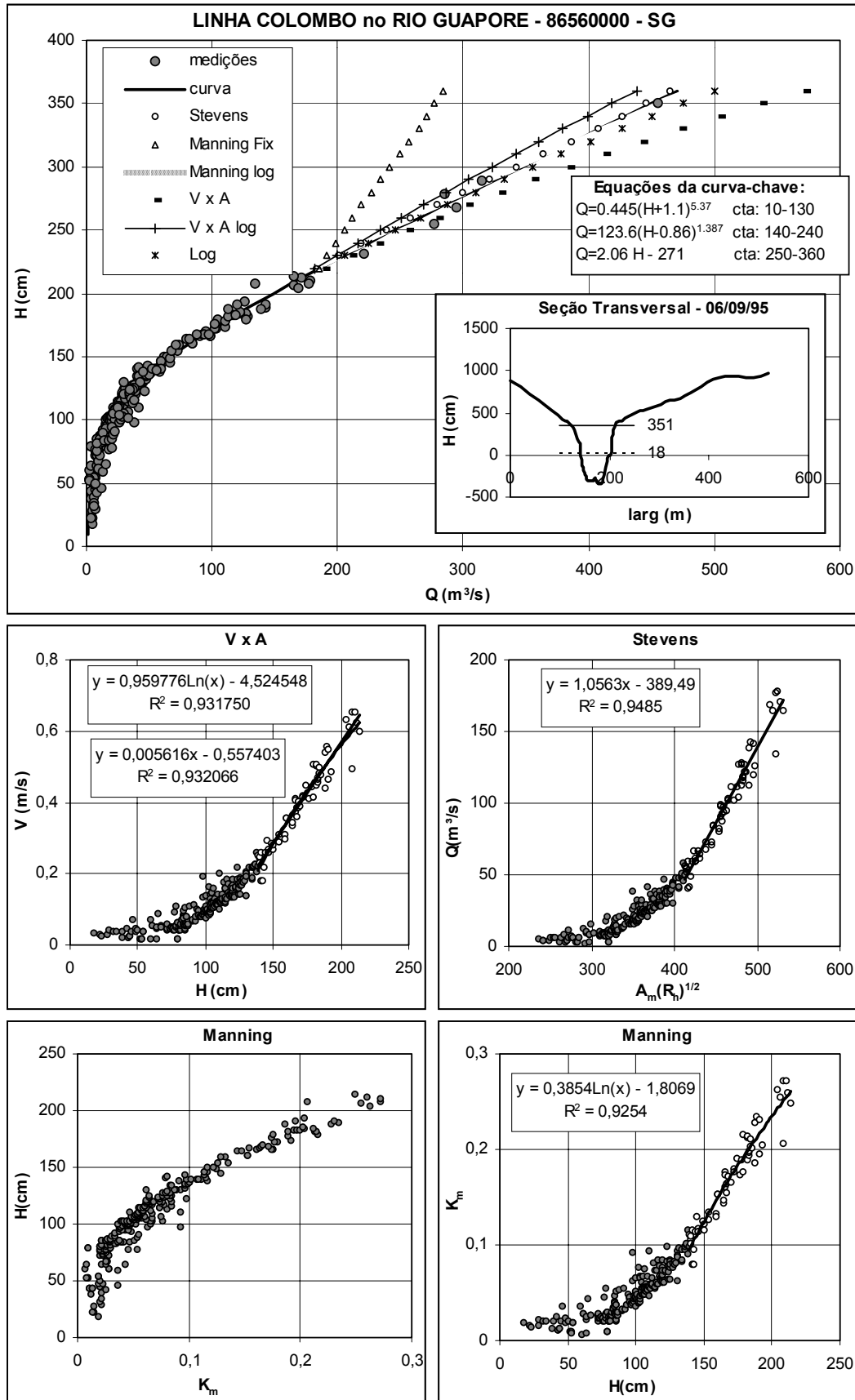


Figura D.88 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

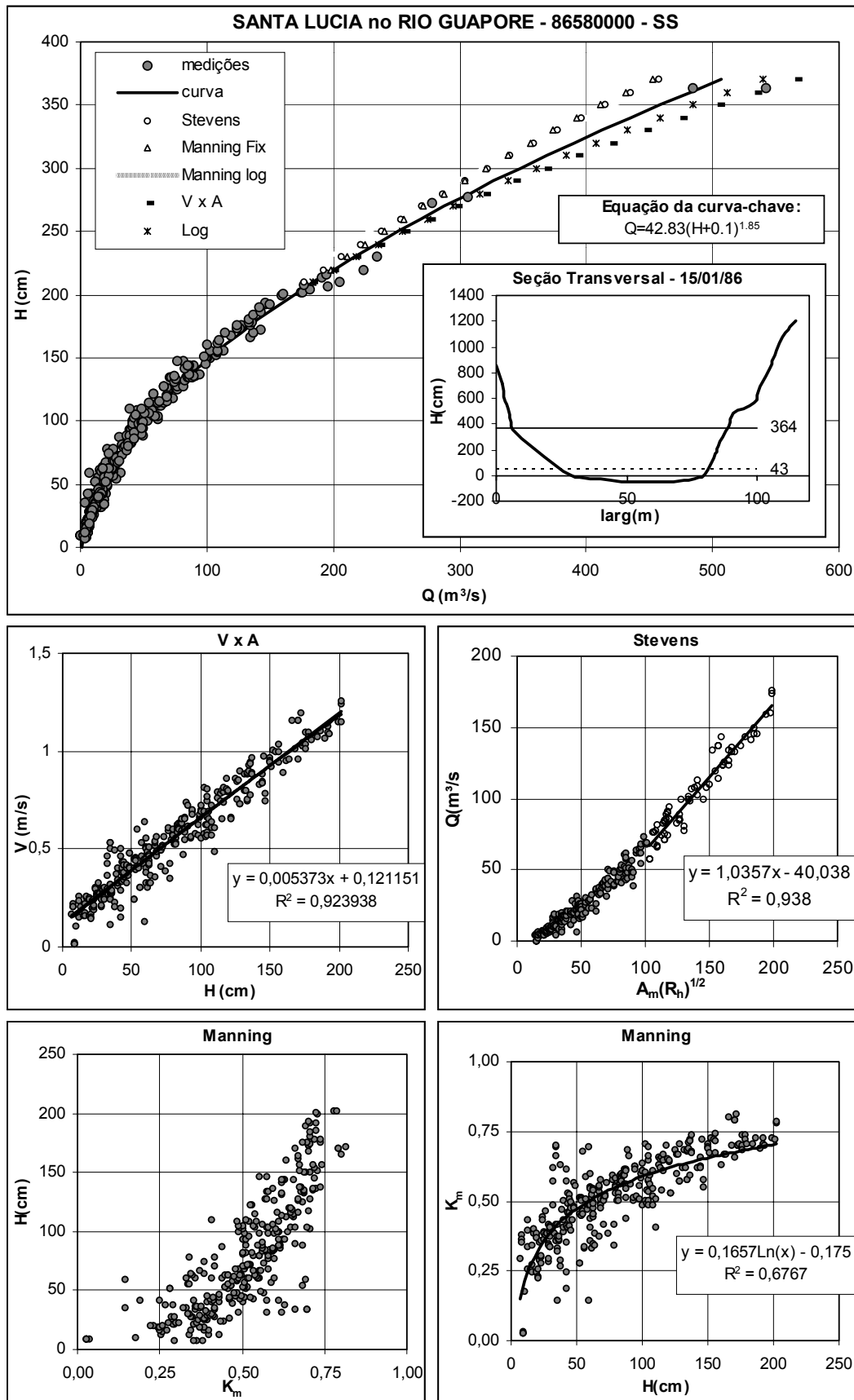


Figura D.89 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

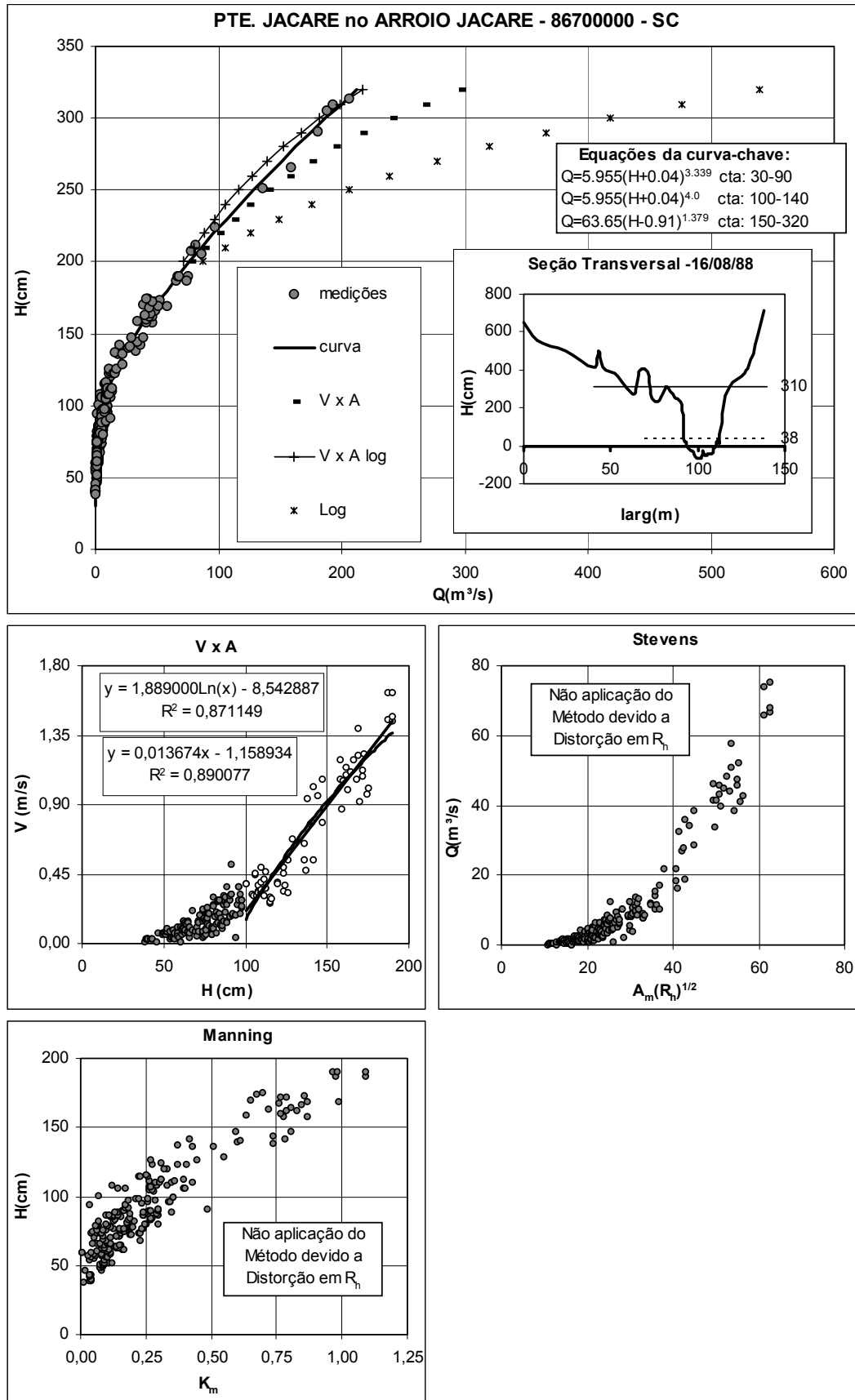


Figura D.90 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

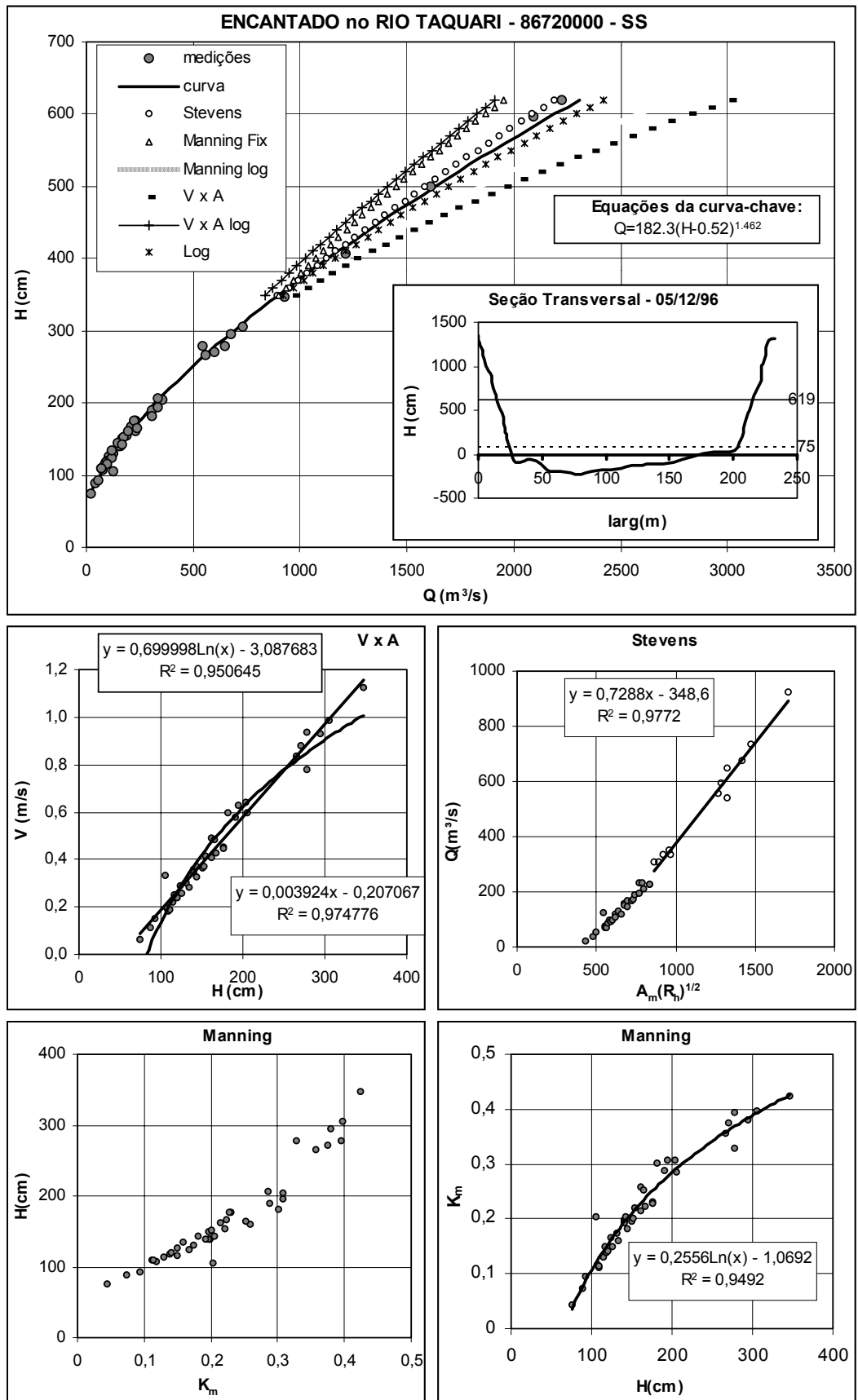


Figura D.91 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

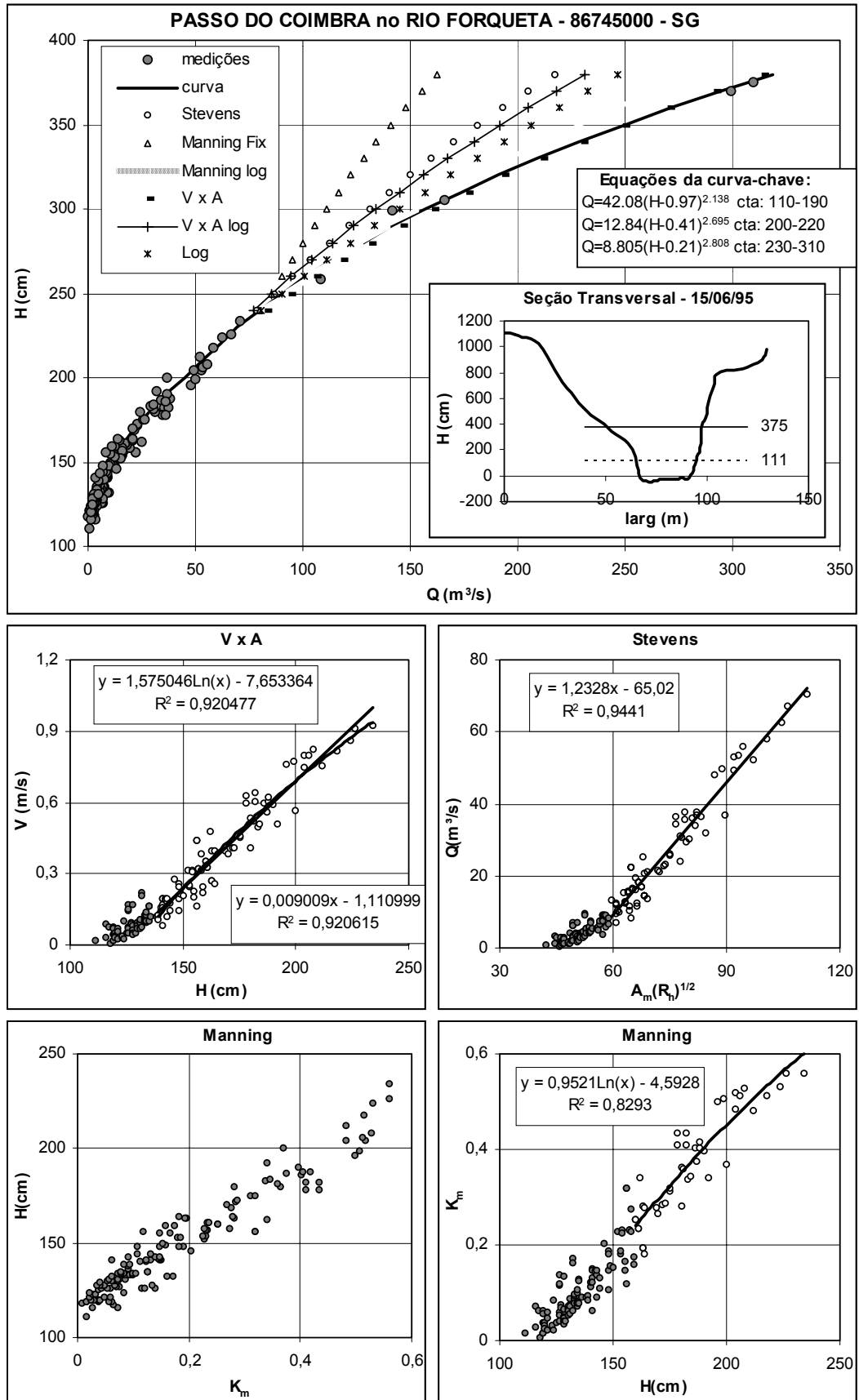


Figura D.92 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

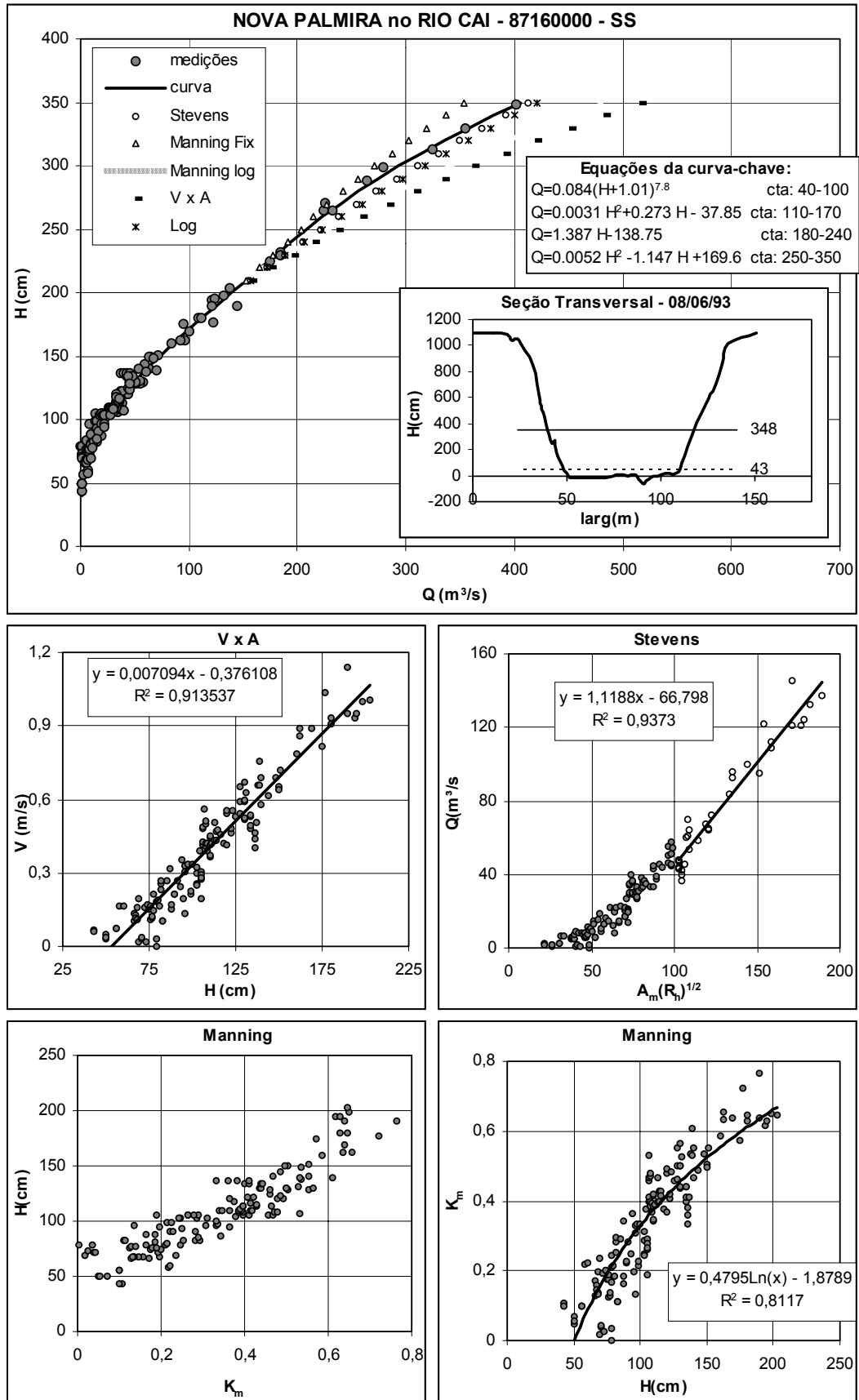


Figura D.93 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

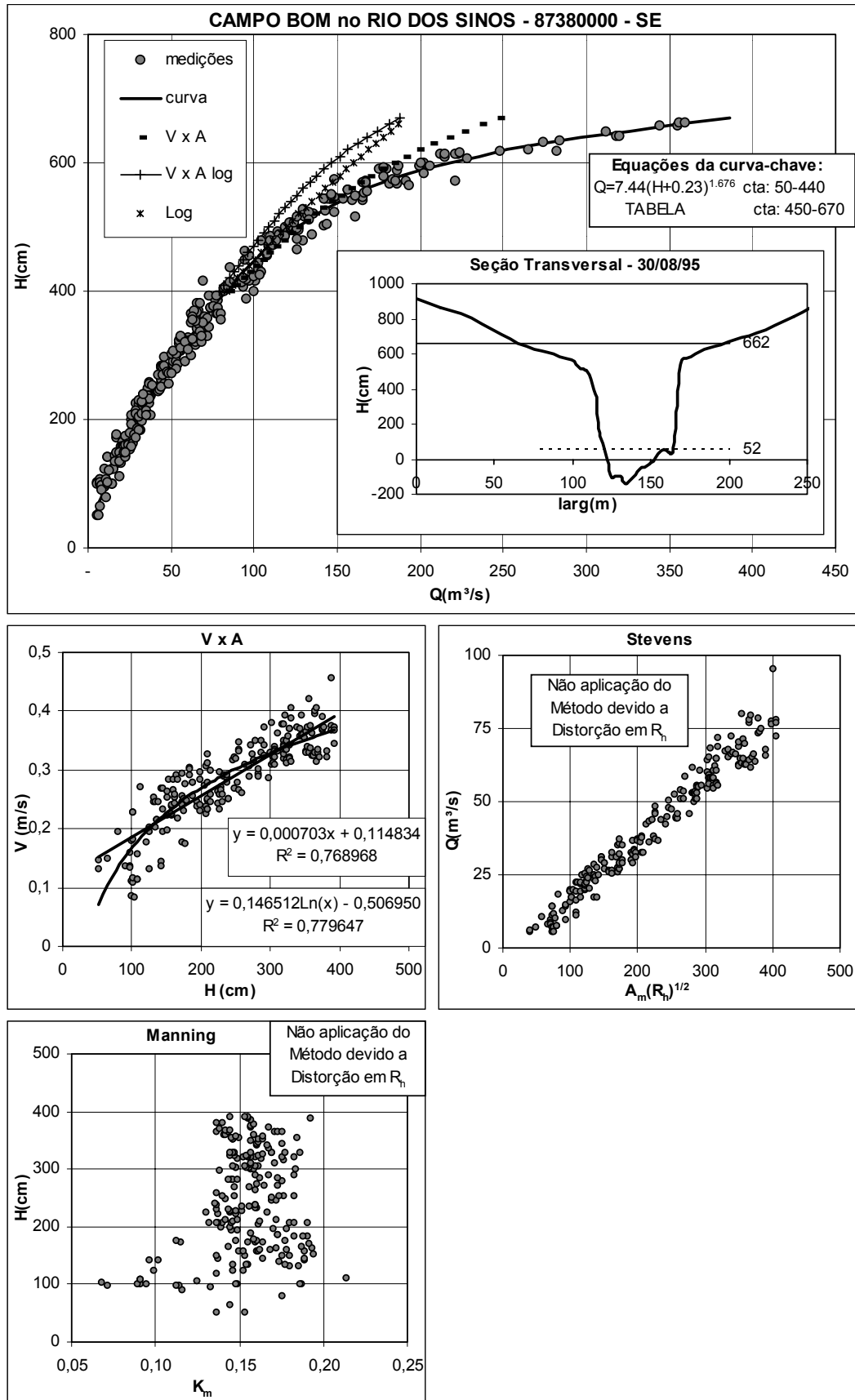


Figura D.94 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

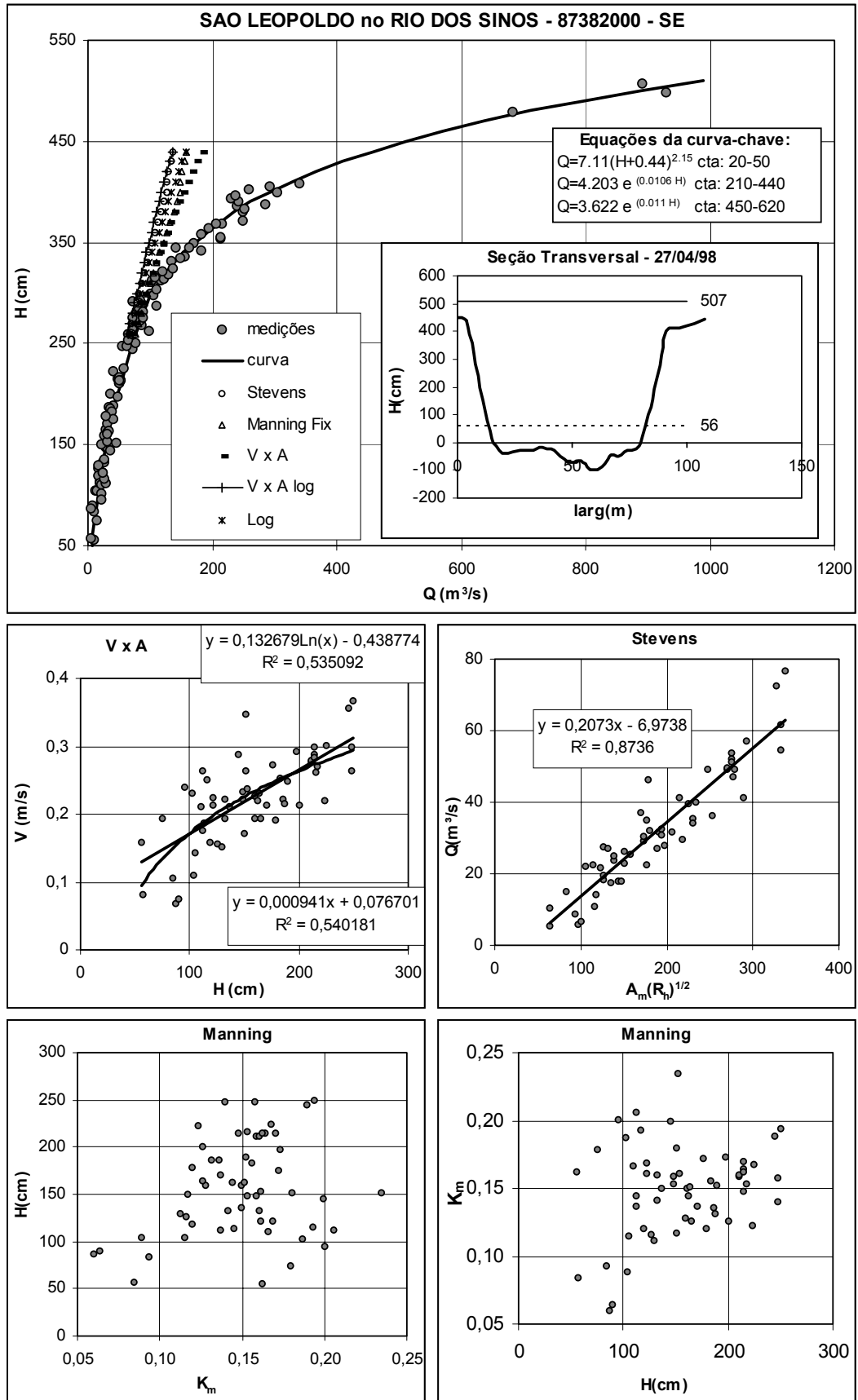


Figura D.95 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

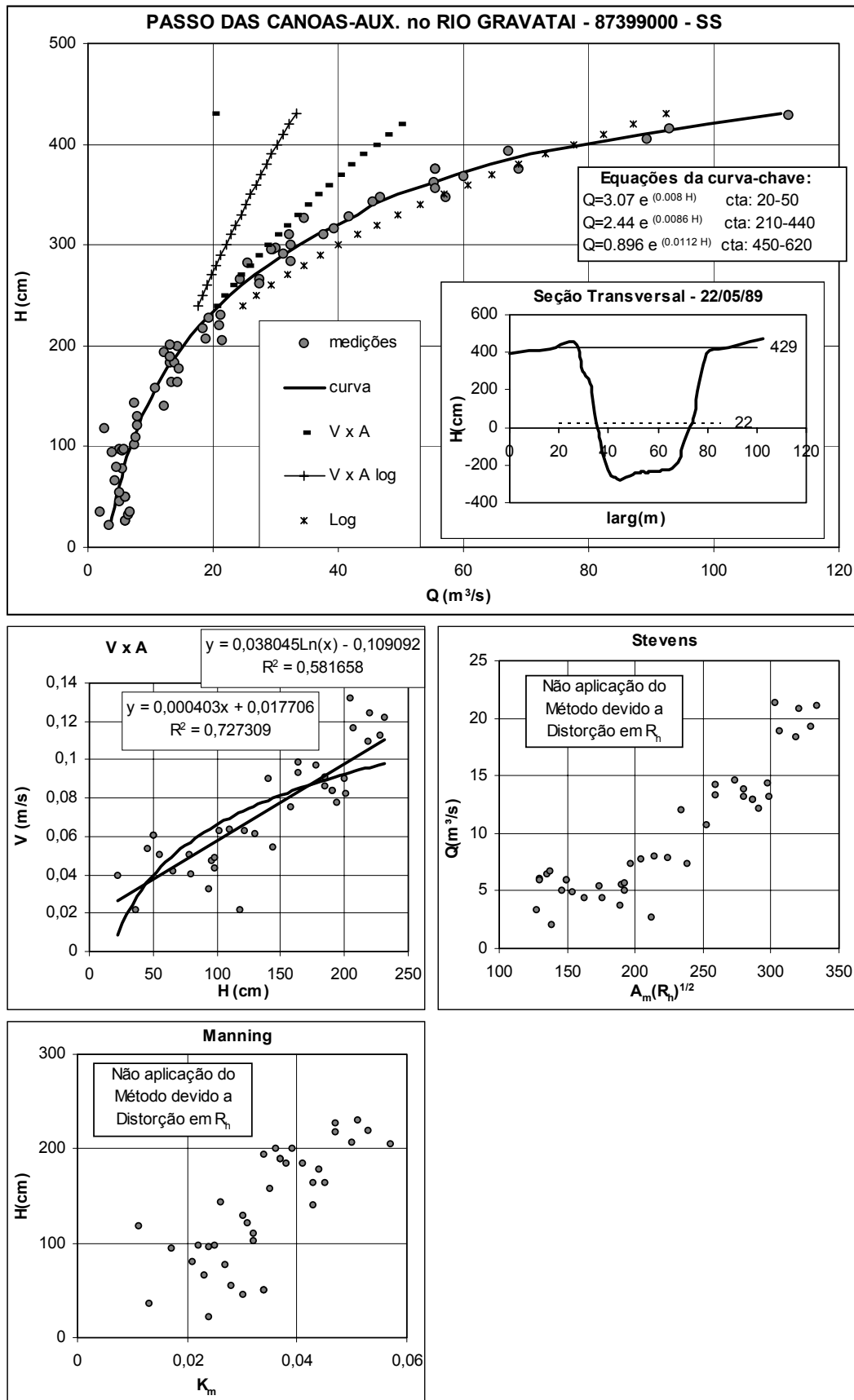


Figura D.96 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

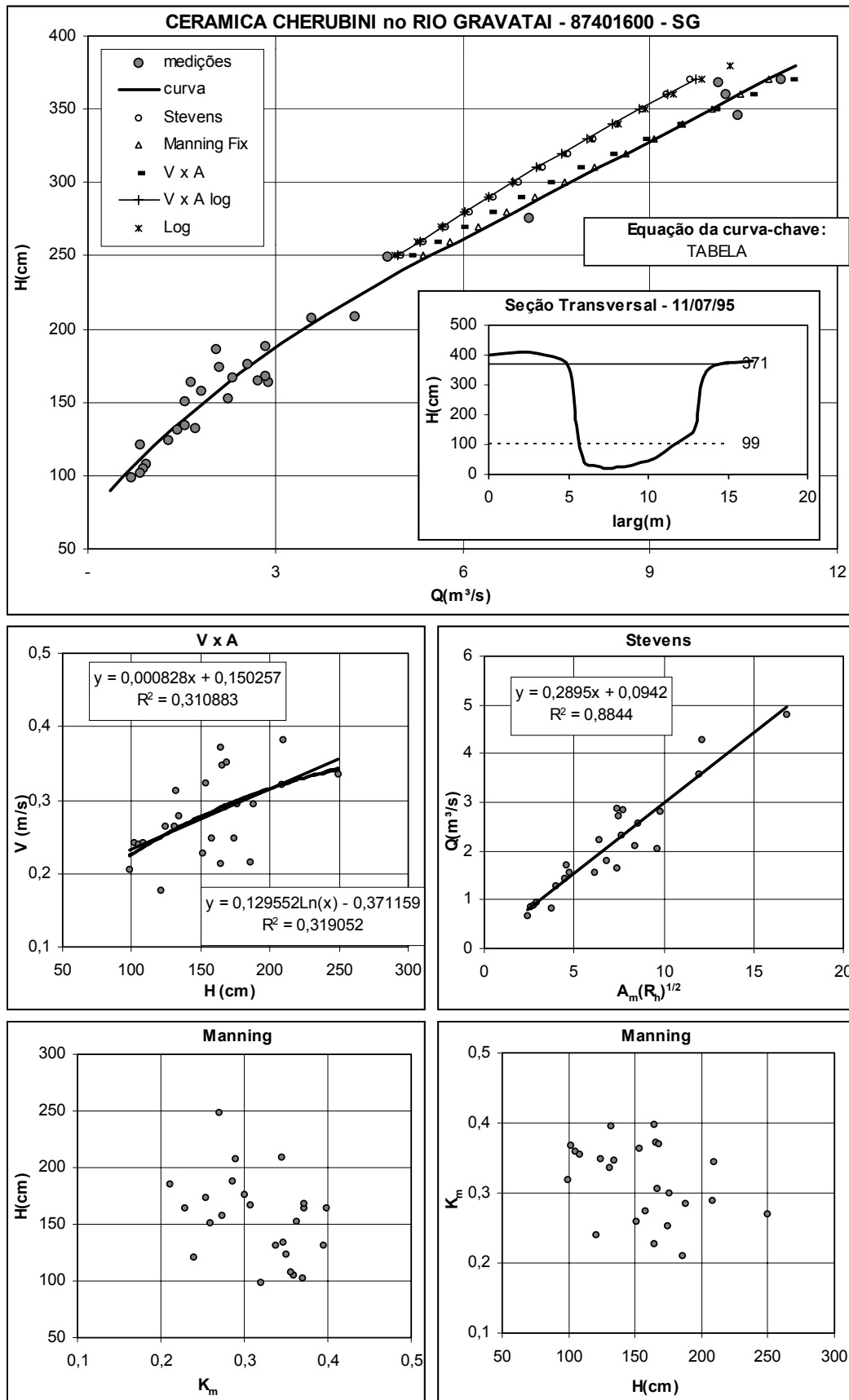


Figura D.97 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

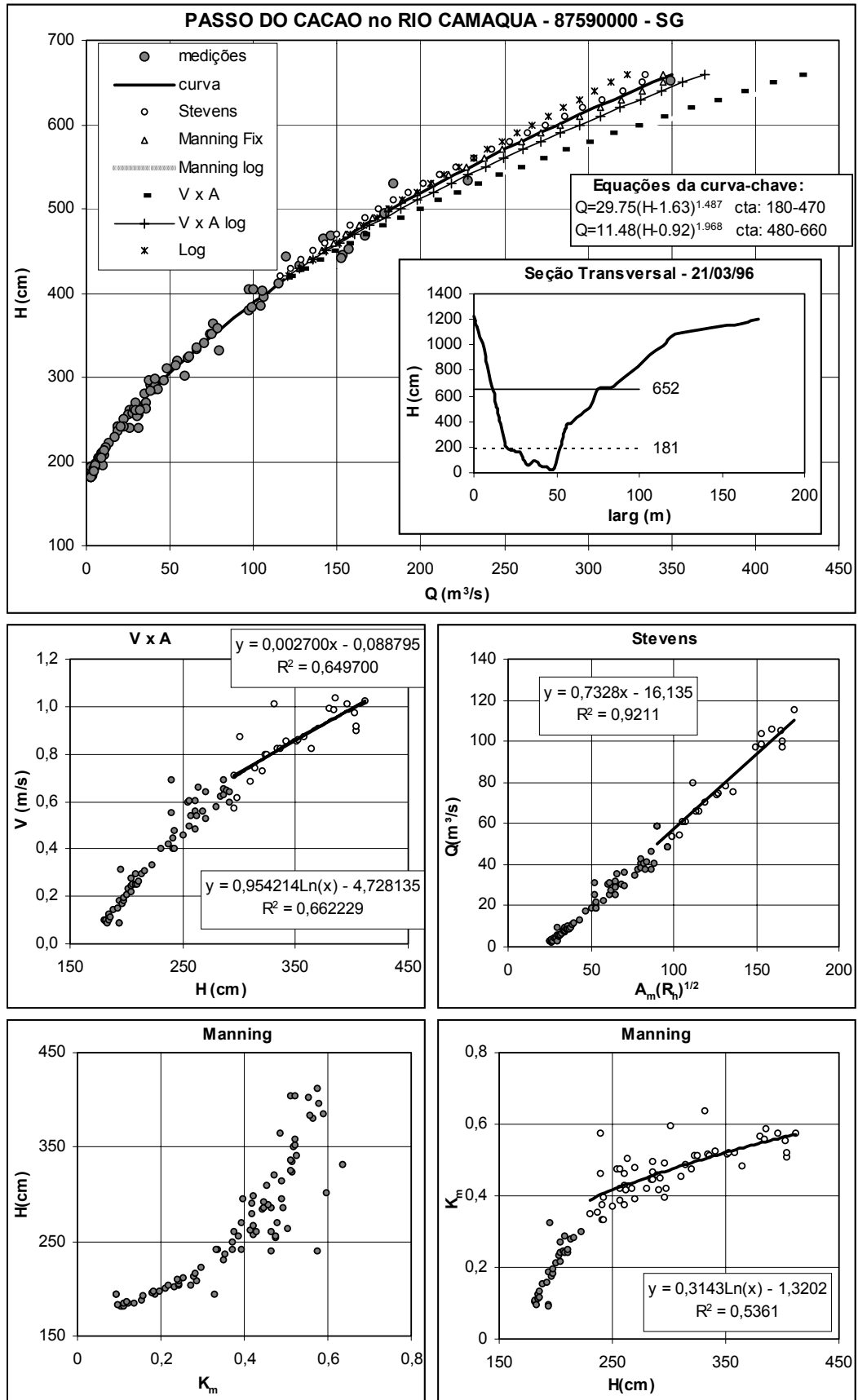


Figura D.98 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

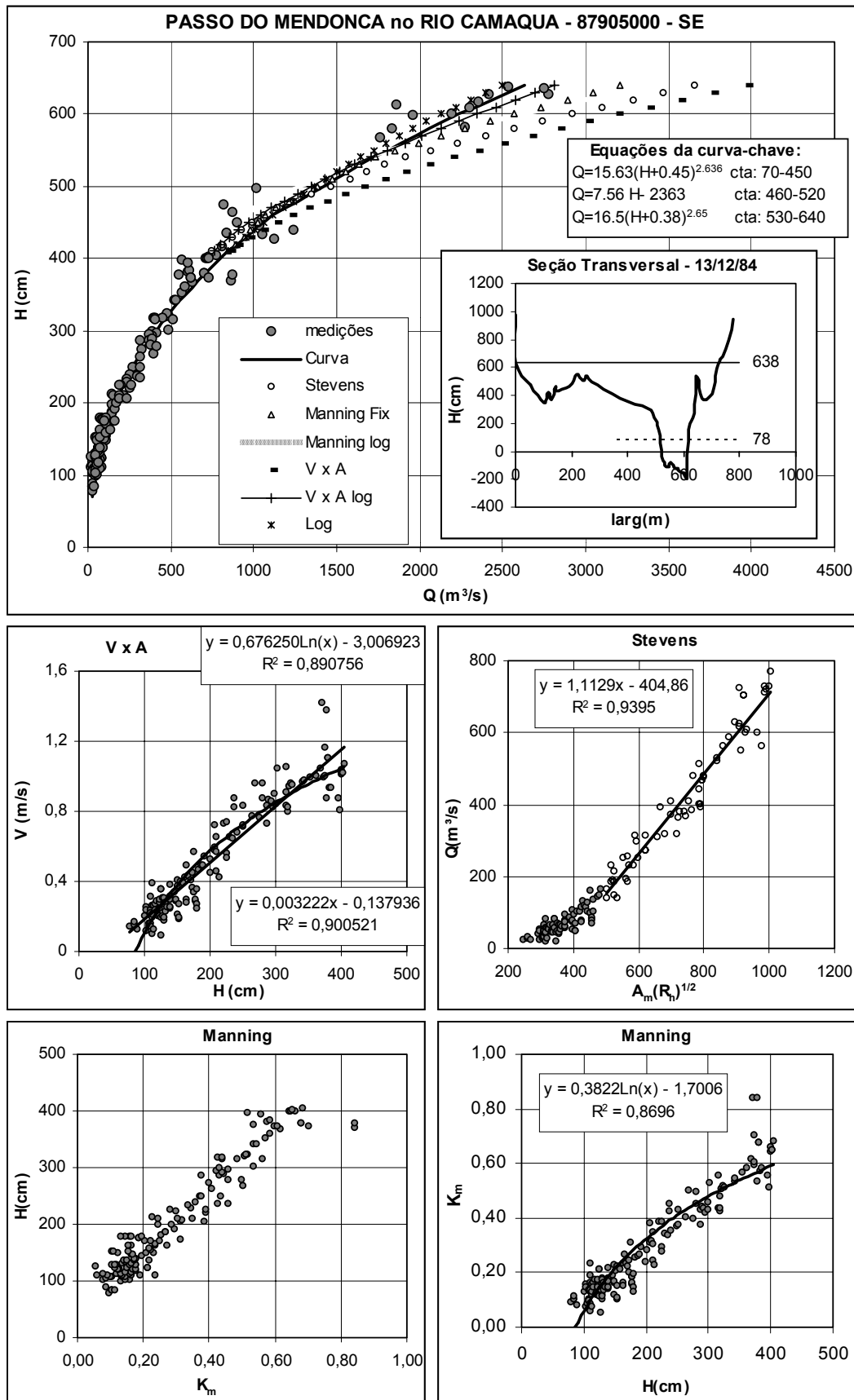


Figura D.99 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.

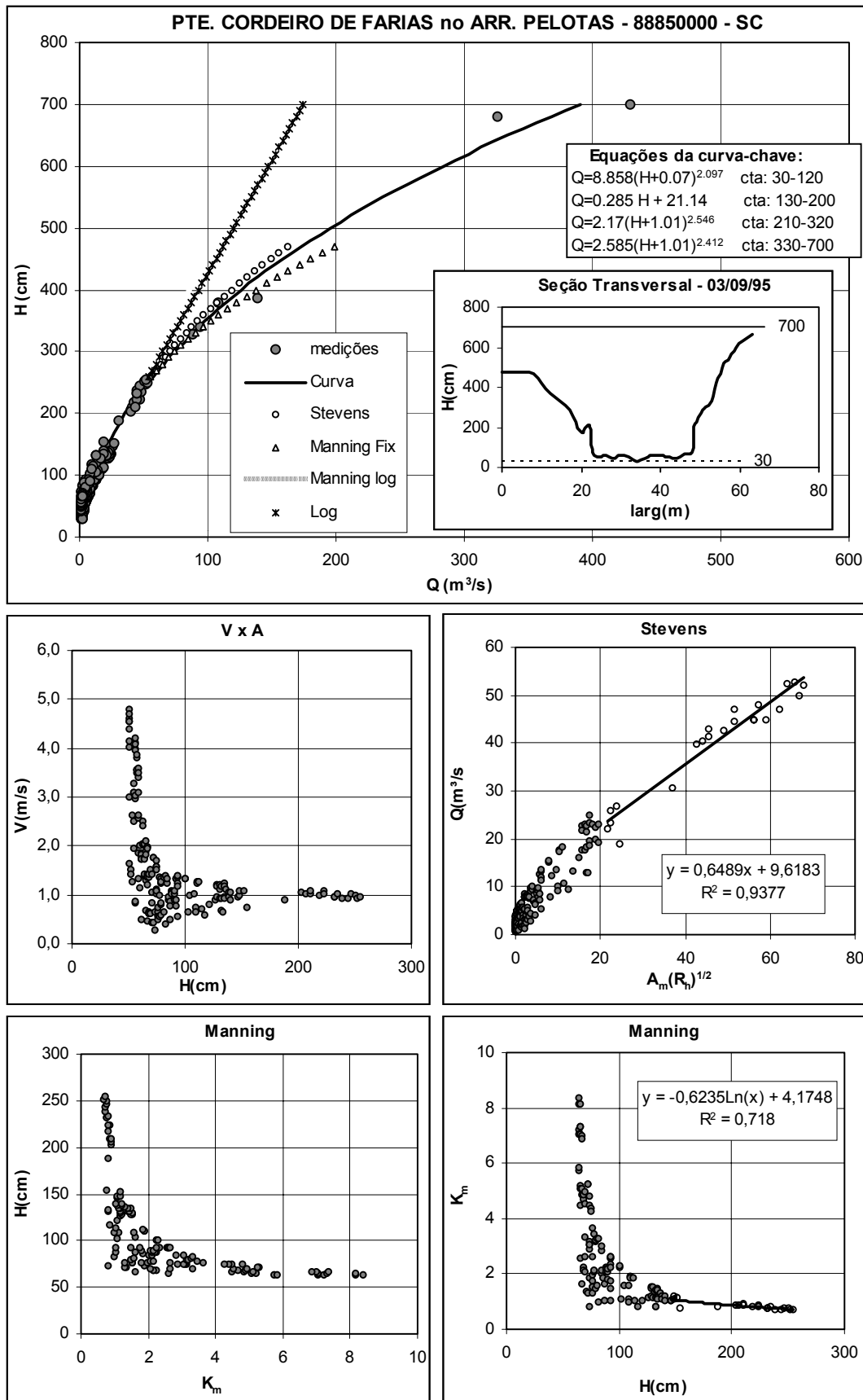


Figura D.100 - Curva-chave, equações de calibração, pseudo-extrapolações, seção transversal e gráficos de apoio.