

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**Osmar Schmidt Filho**

**MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO E AVALIAÇÃO  
DE MÉTODOS DE CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL NO  
RIO VACACAÍ MIRIM**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2016**



**Osmar Schmidt Filho**

**MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO E AVALIAÇÃO DE  
MÉTODOS DE CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL NO RIO VACAÍ  
MIRIM**

Dissertação de mestrado de apresentado ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Hidrossedimentologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

**Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2016**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Schmidt Filho, Osmar  
MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO E AVALIAÇÃO DE  
MÉTODOS DE CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL NO RIO VACACAÍ  
MIRIM / Osmar Schmidt Filho.- 2016.  
180 p.; 30 cm

Orientador: João Batista Dias de Paiva  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, RS, 2016

1. Bacia rural 2. Avaliação temporal 3. Monitoramento  
Sedimentológico 4. Descarga sólida total I. Dias de Paiva,  
João Batista II. Título.

---

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Osmar Schmidt Filho. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.  
e-mail: schmidt.agro@gmail.com

---

**Osmar Schmidt Filho**

**MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO E AVALIAÇÃO DE  
MÉTODOS DE CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL NO RIO VACACAÍ  
MIRIM**

Dissertação de mestrado de apresentado ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Hidrossedimentologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

**Aprovado em 04 de julho de 2016**

---

**João Batista Dias de Paiva, Dr. (UFSM)**

(Orientador)

---

**Nilza Maria dos Reis Castro . Dra. (UFRGS)**

---

**Jean Paolo Gomes Minela Dr. (UFSM )**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2016**



*Dedico aos meus pais  
Osmar e Eliete, aos meus avós  
Aristeu (in memoriam) e Margarida (in memoriam) e  
Sebastião (in memoriam) e Beatriz (in memoriam)  
pelo exemplo de força e determinação*





## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Osmar e Eliete pela dedicação e apoio em todas as horas;

À minha namorada Sizabeli Amaral do Santos pelo incentivo, companheirismo e amor;

À minha irmã Clara Schmidt pelo apoio e parceria;

Aos meus sogros José Juarez e Maria pelo apoio e carinho;

Ao professor João Batista pela orientação, pelos ensinamentos e pela confiança em meu trabalho;

À Universidade Federal de Santa Maria, pelo ensino gratuito e de qualidade proporcionado ao longo da pós-graduação;

Aos técnicos de laboratório Alcides Sartori e José Astério do Carmo pelo apoio nas atividades de campo e de laboratório, pela amizade e paciência;

A Rosa Maria, secretária do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental e Sanitária, pela amizade, atenção e ajuda prestada nos momentos burocráticos;

Aos servidores e professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSM pelo companheirismo e apoio;

Ao grupo GHIDROS pelas instalações e equipamentos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa;

Aos colegas e amigos Glaucia Pivetta, Roberta Lisbôa, Taiane Conterato, Cristiane Graepin, Marielle Medeiros, Robson Ilha, Pablo Valcorte, Vinicius Kuchinski que tornaram mais agradáveis e divertidas as horas de trabalho e as idas ao campo, pela amizade sincera que criamos nesses bons momentos;

Aos bolsistas de iniciação científica Mateus Schmidt e Danrlei de Menezes pela dedicação e empenho no auxílio durante a condução da pesquisa

A CAPES pela bolsa de estudos concedida;

A FUNDEP pelo apoio a pesquisa;

A todos aqueles que não foram citados, mas contribuíram com a mesma importância para a realização deste trabalho;

A todos, **MUITO OBRIGADO!**



## RESUMO

### MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO E AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL NO RIO VACACAÍ MIRIM

AUTOR: OSMAR SCHMIDT FILHO

ORIENTADOR: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

O monitoramento dos eventos de cheia proporcionam o estudo do escoamento gerado durante as chuvas, assim como, a produção e o transporte de sedimentos em bacias rurais e urbanas propiciando dados de monitoramento para futuras aplicações. O trabalho foi realizado em uma seção do rio Vacacaí Mirim próximo ao município de Restinga Seca/RS, de 02 de outubro de 2014 a 03 de dezembro de 2015 com 16 eventos monitorados, com medição de descarga líquida(Q) e descarga sólida após ocorrência de eventos chuvosos. O objetivo do trabalho é realizar a avaliação temporal da produção de sedimentos e alguns métodos de cálculos para estimar o transporte de sedimentos para a seção em estudo. Foram quantificadas as descargas sólidas da seção transversal e a caracterização das granulometrias dos materiais transportados. Determinaram-se as descargas sólidas e líquidas para o período de 2014 e 2015 com o intuito de avaliá-las temporalmente com as descargas sólidas e líquidas entre 2007 a 2015 utilizando o índice de correlação de Pearson (r) e coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Para análise dos resultados obtidos e apontar qual método indireto de cálculo para estimar o transporte de sedimentos é o mais adequado para o atual estudo e compará-los com estudos anteriores com o uso do índice de dispersão (ID) proposto por Aguirre et al. (2004). O material em suspensão demonstrou ser quase totalidade da descarga sólida do rio. A composição granulométrica deste material tem a predominância de silte (58,3%) seguida de areia (28,4 %) e argila (13,4%). Para o material de leito e de arraste, constatou-se a predominância de areia, seguida de silte e argila. A descarga sólida total mensal média até a seção de medição para 2014 a 2015 foi 117.554,62 toneladas e a perda de camada de solo 0,05 mm em 15 meses avaliados. Para o período de 2007 a 2015 a descarga total foi 141.039,37 ton/ano e a perda de camada de solo foi 0,06 mm/ano. Os métodos mais adequados para o cálculo da descarga sólida total foram os métodos de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), que incluem dados medidos de concentração de sedimentos, com Índice de dispersão(ID) 0,09 e 2,30 respectivamente. Dos métodos preditivos para descarga sólida total os métodos mais adequados foram Toffaleti (1969) com valor de ID = 1,42, Engelund & Hansen (1967) ID = 2,38, Ackers e White (1973) ID = 2,44, Laursen (1958 ) ID = 4,07 e Yang (1973) ID= 9,42 e para descarga sólida de leito os melhores resultados foram obtidos pelos métodos de Van Rijn (1984) ID = 0,77, Karim (1998) com ID = 1,66, Meyer-Peter e Müller (1948) com ID de 6,08.

**Palavras-Chave:** bacia rural, avaliação temporal, monitoramento

Sedimentológico, descarga sólida total.



## ABSTRACT

### HIDROSEDIMENTOMETRY MONITORING AND DISCHARGE OF CALCULATION METHODS OF ASSESSMENT ON SOLID TOTAL VACACAÍ MIRIM RIVER

AUTHOR: OSMAR SCHMIDT FILHO

ADVISER: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

The monitoring of flood events provide the study of the flow generated during the rains, as well as the production and sediment transport in rural and urban watersheds providing monitoring data for future applications. The work was carried out in a section of Vacacaí Mirim river near the municipality of Restinga Sêca / RS of October 02, 2014 in December 3, 2015 with 16 events monitored with liquid discharge measurement (Q) and solid discharge after occurrence of rainy events. The objective is to perform the temporal assessment of sediment yield and some methods of calculations to estimate sediment transport to the section in the study were quantified solid discharges of the cross section and the characterization of particle sizes of the transported materials. Were determined the solid and liquid discharges for the 2014 period and 2015 in order to evaluate them temporally with the solid and liquid discharges between 2007-2015 using the Pearson correlation coefficient (r) and coefficient of determination ( $r^2$ ). To analyze the results and point out that indirect method of calculation to estimate sediment transport is the most suitable for the current study and compare them with previous studies using the dispersion index (DI) proposed by Aguirre et al. (2004).. The suspended material was shown to be almost all of the solid discharge in river. The granulometric composition of this material is the predominance of silt (58.3%) Sand then (28.4%) and clay (13.4%). For the material bed and drag, there was a predominance of sand, followed by silt and clay. The total solid monthly discharge to the measurement section to 2014-2015 was 117554.62 tons in 15 months evaluated. For the period 2007-2015 the total discharge was 141,039.37 tons/year. The most appropriate methods for the total solid discharge were Einstein's methods modified by Colby and Hembree (1955), Colby (1957), which include the measured sediment concentration data, dispersion index (DI) 0.09 and 2.30 respectively. Predictive methods for overall solid discharge the most appropriate methods were Toffaleti (1969) with value DI = 1.42, Engelund & Hansen (1967) DI = 2.38, Ackers and White (1973) DI = 2.44, Laursen (1958) DI = 4.07 and Yang (1973) DI = 9.42 and unloading solid bed best results were obtained by the methods of Van Rijn (1984) DI = 0.77, Karim (1998), DI = 1.66, Meyer-Peter and Müller (1948) with 6.08 DI.

**Keywords:** rural basin, temporal evaluation, sediment monitoring



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO NA BACIA DO RIO VACACAÍ MIRIM EM RESTINGA SÊCA.....	56
FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL EM ESTUDO: A – A MONTANTE E B – A JUSANTE.....	57
FIGURA 3 – IMAGEM DE SATÉLITE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DO RIO VACACAÍ MIRIM ....	57
FIGURA 4- MODELO NUMÉRICO DE TERRENO DA BACIA DO RIO VACACAÍ MIRIM. ....	58
FIGURA 5 - MAPA DE DECLIVIDADE (S) DA BACIA HIDROGRÁFICA RIO VACACAÍ MIRIM. ....	58
FIGURA 6 - USO DO SOLO DA BACIA DO RIO VACACAÍ MIRIM NO ANO DE 2004. ....	59
FIGURA 7 - TIPOS DE SOLO PRESENTES NA BACIA DO RIO VACACAÍ MIRIM. ....	60
FIGURA 8- AMOSTRADOR USDH 59 (AMS-1).....	62
FIGURA 9 - AMOSTRADOR HELLEY SMITH (US-BL-84).....	63
FIGURA 10- AMOSTRADOR DE CAÇAMBA DE ESCAVAÇÃO US-BMH-60 .....	64
FIGURA 11 - RELAÇÃO DE TOFFALETI PARA CÁLCULO DA QST (SIMONS & SENTURURK, 1977).....	78
FIGURA 12 - FATOR DE CORREÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO LOGARÍTMICA DA VELOCIDADE SEGUNDO EINSTEIN (1950). ....	93
FIGURA 13 - ÁBACO DA FUNÇÃO DE CARGA DO FUNDO SEGUNDO EINSTEIN (1950).....	94
FIGURA 14 – 4 VALORES DE Z' EM FUNÇÃO DE Q'S / IF.QF, PARA O GRÃO DOMINANTE SEGUNDO COLBY E HUBEL (1964). FONTE: PAIVA (2001).....	97
FIGURA 15 - (A)VALORES DE I1, EM TERMOS DE E1, PARA VÁRIOS VALORES DE Z; (B) VALORES DE I2, EM TERMOS DE E, PARA VÁRIOS VALORES DE Z, SEGUNDO EINSTEIN (1950). FONTE: JULIEN ET. AL. (1995). ....	98
FIGURA 16 -(A) INTEGRAL DE J1 EM TERMOS DE E1 E Z'; (B) INTEGRAL DE J1 EM TERMOS DE E1 E Z', SEGUNDO COLBY E HEMBREE (1955).FONTE: PAIVA (2001). ....	99
FIGURA 17-(A) INTEGRAL DE J2 EM TERMOS DE E1 E Z' 6B; (B) INTEGRAL DE J2 EM TERMOS DE E1 E Z' SEGUNDO COLBY E HEMBREE (1955).FONTE: PAIVA (2001). ....	100

FIGURA 18 - OBTENÇÃO DA DESCARGA SÓLIDA NÃO MEDIDA APROXIMADA, POR METRO DE LARGURA DO RIO, A PARTIR DA VELOCIDADE MÉDIA DO CURSO D'ÁGUA .....	103
FIGURA 19 – PERFIL LONGITUDINAL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO VACACAÍ MIRIM PARA O DIA 04/03/2015 .....	107
FIGURA 20 - PERFIL LONGITUDINAL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO VACACAÍ MIRIM PARA O DIA 22/07/2015 .....	108
FIGURA 21 - CURVA-CHAVE DA SEÇÃO VACACAI MIRIM RESTINGA SÊCA VÁLIDA PARA COTAS MAIORES OU IGUAIS A 2,54M E INFERIORES A 6,84 M.....	119
FIGURA 22 - CURVA-CHAVE DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO (QSS) DA SEÇÃO VACACAI MIRIM RESTINGA SÊCA.....	120
FIGURA 23 - CURVA-CHAVE DA DESCARGA DE SEDIMENTOS TOTAL (QST) DA SEÇÃO DO RIO VACACAI MIRIM, EM RESTINGA SÊCA .....	122
FIGURA 24 - CURVA- CHAVE PARA CADA PERÍODO TODOS OS PERÍODO AVALIADOS, VÁLIDA DE 2007 A 2015.....	129
FIGURA 25 – CURVA- CHAVE ÚNICA PARA DESCARGA LÍQUIDA DO PERÍODO DE 2007 A 2015 .	131
FIGURA 26 – CURVA – CHAVE DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA OS PERÍODOS 2007/2010, 2011/2012, 2014/2015.....	133
FIGURA 27 - CURVA – CHAVE ÚNICA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA O PERÍODO DE 2007 A 2015 .....	134
FIGURA 28 - CURVA – CHAVE DA DESCARGA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA OS PERÍODOS 2007/2010, 2011/2012, 2014/2015.....	137
FIGURA 29 - CURVA – CHAVE ÚNICA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA O PERÍODO DE 2007 A 2015 .....	138
FIGURA 30 - CURVA-CHAVE DA DESCARGA DE SEDIMENTOS TOTAL PARA OS PERÍODOS EM SEPARADO 2007/2010, 2011/2012, 2014/2015 .....	140
FIGURA 31 - CURVA – CHAVE ÚNICA DA DESCARGA DE SEDIMENTOS TOTAL PARA O PERÍODO DE 2007 A 2015.....	142
FIGURA 32 – CURVA CHAVE PARA DESCARGA LÍQUIDA PARA O PERÍODO DE PLANTIO .....	144
FIGURA 33 - CURVA CHAVE PARA DESCARGA LÍQUIDA PARA O PERÍODO SEM CULTIVO DE ARROZ.....	146



FIGURA 34 - CURVA CHAVE DE CSS PERÍODO DE PLANTIO DE OUTUBRO A MARÇO.....	148
FIGURA 35 - CURVA CHAVE DE CSS PERÍODO SEM PLANTIO DE ABRIL A SETEMBRO .....	149
FIGURA 36 - CURVA CHAVE DE QSS PERÍODO DE PLANTIO DE OUTUBRO A MARÇO .....	151
FIGURA 37 - CURVA CHAVE DE QSS PERÍODO SEM PLANTIO DE ABRIL A SETEMBRO .....	153
FIGURA 38 - CURVA CHAVE DE QST PERÍODO COM PLANTIO DE OUTUBRO A MARÇO .....	154
FIGURA 39 - CURVA CHAVE DE QST PERÍODO SEM PLANTIO DE ABRIL A SETEMBRO .....	156
FIGURA 40 - TOTAIS ANUAIS DA DESCARGA SÓLIDA MENSAL DE 2007 A 2015.....	161
FIGURA 41 - MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA DO VACACAÍ MIRIM NO ANO DE 2015.....	164



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES SEDIMENTOMÉTRICA E FLUVIOMÉTRICA UTILIZADAS NESTE ESTUDO. ....	55
TABELA 2 - USO DO SOLO NA BACIA DO RIO VACACAÍ MIRIM EM 2004.....	59
TABELA 3- VALORES PARA A COMPUTAÇÃO DO COEFICIENTE DE MANNING.....	67
TABELA 4- VALORES PARA A COMPUTAÇÃO DO COEFICIENTE DE MANNING (CONTINUAÇÃO) .....	68
TABELA 5 - VALORES DE A E B PARA CR EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE MÉDIA.....	102
TABELA 6 - ORIGEM E PERÍODO DE MONITORAMENTO UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO TEMPORAL DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO RIO VACACAÍ MIRIM.....	104
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS E GEOMÉTRICAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE RESTINGA SÊCA.....	109
TABELA 8 – VALORES DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO. DESCARGAS SÓLIDAS , MATÉRIA ORGÂNICA .....	111
TABELA 9 - DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS DAS AMOSTRAS DE MATERIAL ARRASTE DE FUNDO .....	113
TABELA 10 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS FRAÇÕES DO MATERIAL ARRASTE DE FUNDO .....	114
TABELA 11 - DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS DAS AMOSTRAS DE MATERIAL DE LEITO.....	115
TABELA 12 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA AS FRAÇÕES DO MATERIAL DE LEITO.....	116
TABELA 13 - DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS DAS AMOSTRAS DE MATERIAL EM SUSPENSÃO .....	117
TABELA 14 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SEDIMENTO EM SUSPENSÃO.....	118
TABELA 15- CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS) .....	124
TABELA 16 – DESCARGA SÓLIDA MENSAL OUTUBRO 2014 A DEZEMBRO DE 2015 .....	126
TABELA 18 -DESCARGA SÓLIDA MEDIDA EM SUSPENSÃO E DE FUNDO .....	128

TABELA 18 – DESCARGA SÓLIDA MENSAL DO ANO 2007 A 2015 .....	159
TABELA 19 - EQUIVALENTE A PERDA DE UMA CAMADA DO SOLO NO PERÍODO NOS 3 PERÍODOS AVALIADOS .....	162
TABELA 20 – COMPARAÇÃO DAS CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA DO VACACAÍ MIRIM.....	164
TABELA 21 - DESCARGA SÓLIDA TOTAL MEDIDA E CALCULADA PELOS MÉTODOS DE CALCULO PARA O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	167
TABELA 22 - ÍNDICE DE DISPERSÃO (ID) PARA OS MÉTODOS DE CÁLCULO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS AVALIADOS NESTE ESTUDO, NO RIO VACACAÍ MIRIM EM RESTINGA SÊCA.....	168
TABELA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE ID CALCULADO, APRESENTADO POR SCAPIN (2005), RIZZARDI (2013) E AGUIRRE-PE (2004) .....	169

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - RELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR ALGUNS AUTORES EM ESTUDOS DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS, REALIZADOS NO BRASIL .....	47
QUADRO 2 - RELAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR ALGUNS AUTORES EM ESTUDOS DE CÁLCULOS DE CARGA DE SEDIMENTO A PARTIR DE MEDIÇÕES PONTUAIS REALIZADOS NO MUNDO .....	50
QUADRO 3 - MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E ENSAIOS LABORATORIAIS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS.....	61
QUADRO 4 - MÉTODOS INDIRETOS PARA A DETERMINAÇÃO DA DESCARGA SÓLIDA.....	68



## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - COEFICIENTE DE MANNING PROPOSTO POR COWAN (1944).....	67
EQUAÇÃO 2 - DECLIVIDADE DA LINHA D' ÁGUA.....	68
EQUAÇÃO 3 – VELOCIDADE DE ATRITO.....	69
EQUAÇÃO 5 – MOBILIDADE DO SEDIMENTO.....	70
EQUAÇÃO 6 – FUNÇÃO GERAL PARA O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	70
EQUAÇÃO 7 - EQUAÇÃO GERAL PARA O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	70
EQUAÇÃO 8 – DESCARGA SÓLIDA ADIMENSIONAL.....	70
EQUAÇÃO 9 - - VALORES PARA N, A , M E CA.....	71
EQUAÇÃO 10 – NÚMERO DE PONTOS AMOSTRADOS PARA $1 \leq DGR \leq 60$ .....	71
EQUAÇÃO 11- ÁREA TRANSVERSAL AO ESCOAMENTO.....	71
EQUAÇÃO 12 - EXPOENTE EM FUNÇÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO.....	71
EQUAÇÃO 13 - COEFICIENTE DA FUNÇÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO.....	71
EQUAÇÃO 14 - COEFICIENTE DA FUNÇÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO REVISADA POR WALLINGFORD (1990). .....	72
EQUAÇÃO 16 - CONCENTRAÇÃO DA DESCARGA SÓLIDA DE SEDIMENTO DO MATERIAL DE LEITO (PPM).....	72
EQUAÇÃO 17 - DESCARGA SÓLIDA TOTAL.....	72
EQUAÇÃO 18 - VELOCIDADE DE ATRITO RELATIVA AOS GRÃOS.....	73
EQUAÇÃO 19 – VELOCIDADE DE QUEDA DO SEDIMENTO EM SUSPENSÃO PELA EQUAÇÃO DE RUBEY.....	73
EQUAÇÃO 20 - VELOCIDADE DE QUEDA DO SEDIMENTO.PELA EQUAÇÃO DE STOKES.....	74
EQUAÇÃO 21 - RELAÇÃO PARA ESCOAMENTO E A VELOCIDADE DE QUEDA PARA $1,2 \leq U,D/N < 70$ .....	74
EQUAÇÃO 22- RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE CRÍTICA ADIMENSIONAL DO ESCOAMENTO E A VELOCIDADE DE QUEDA PARA $70 < U,D/N$ .....	74
EQUAÇÃO 23 - CONCENTRAÇÃO TOTAL DE MATERIAL DE LEITO PARA DIÂMETROS ATÉ 2 MM.....	74
EQUAÇÃO 24- CONCENTRAÇÃO TOTAL DE MATERIAL DE LEITO DE DIÂMETRO SUPERIORES A 2 MM.....	74
EQUAÇÃO 25 - DESCARGA SÓLIDA (TON/DIA).....	75

EQUAÇÃO 26 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DA DESCARGA DO MATERIAL DO LEITO (PPM).....	75
EQUAÇÃO 27 - COEFICIENTE DE RELAÇÃO ENTRE AS FORÇAS TANGENCIAIS CRÍTICAS PARA $DSI/\Delta > 1$ .....	76
EQUAÇÃO 28 - COEFICIENTE DA RELAÇÃO ENTRE AS FORÇAS TANGENCIAIS CRÍTICAS PARA $0,1 > DSI/\Delta < 0,03$ .....	76
EQUAÇÃO 29 - COEFICIENTE DA RELAÇÃO ENTRE AS FORÇAS TANGENCIAIS CRÍTICAS PARA $0,03 > DSI/\Delta$ .....	76
EQUAÇÃO 30 - ESPESSURA DE A CAMADA LAMINAR.....	76
EQUAÇÃO 31 - DESCARGA SÓLIDA TOTAL POR UNIDADE DE LARGURA .....	76
EQUAÇÃO 32 - DESCARGA SÓLIDA TOTAL DE MATERIAL DO LEITO .....	77
EQUAÇÃO 33 - VELOCIDADE DA CORRENTE À DISTÂNCIA ACIMA DO LEITO .....	78
EQUAÇÃO 34 - VALOR CALCULADO EMPIRICAMENTE.....	78
EQUAÇÃO 35 – EXPOENTE ZI .....	78
EQUAÇÃO 36 - DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA ZONA SUPERIOR.....	79
EQUAÇÃO 37 - DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA ZONA SUPERIOR.....	79
EQUAÇÃO 38 - DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA ZONA INTERMEDIÁRIA .....	79
EQUAÇÃO 39- DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA ZONA INFERIOR.....	79
EQUAÇÃO 40- PARÂMETRO MI USADO NO CALCULO DE DESCARGA SÓLIDA.....	79
EQUAÇÃO 41- PARÂMETRO $N_1$ USADO NO CALCULO DE DESCARGA SÓLIDA. ....	79
EQUAÇÃO 42- PARÂMETRO $N_2$ USADO NO CÁLCULO DE DESCARGA SÓLIDA. ....	79
EQUAÇÃO 43- PARÂMETRO $N_3$ USADO NO CALCULO DE DESCARGA SÓLIDA .....	80
EQUAÇÃO 44- DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA ZONA INFERIOR.....	80
EQUAÇÃO 45- PARÂMETRO $T_T$ .....	80
EQUAÇÃO 46 - DESCARGA SOLIDA EM SUSPENSÃO NA ZONA INFERIOR.....	80
EQUAÇÃO 47 – CONCENTRAÇÃO ( $C_i$ ) Y .....	81
EQUAÇÃO 50 – APLICAÇÃO DA PROPOSTA DE MEYER PETER & MÜLLER .....	81
EQUAÇÃO 51 – COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE STRICLER. ....	82
EQUAÇÃO 52 – COEFICIENTE DE RUGOSIDADE .....	82
EQUAÇÃO 54 – DESCARGA TOTAL DE SEDIMENTOS POR UNIDADE DE LARGURA.....	83
EQUAÇÃO 55- PARÂMETRO ADIMENSIONAL DA TENSÃO DE ATRITO. ....	83
EQUAÇÃO 56 - PARÂMETRO ADIMENSIONAL DE TRANSPORTE.....	83



EQUAÇÃO 57 – DESCARGA SÓLIDA TOTAL.....	83
EQUAÇÃO 58 - RELAÇÃO DE KARIM (1998) PROPOSTA PARA ESCOAMENTO EM LEITO ARENOSO. ....	84
EQUAÇÃO 59 - VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS.....	84
EQUAÇÃO 60 – DESCARGA SÓLIDA TOTAL.....	84
EQUAÇÃO 61 – NÚMERO DE REYNOLDS.....	85
EQUAÇÃO 62 – ALTURA DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE NIKURADSE.....	85
EQUAÇÃO 63 – FATOR DE ATRITO.....	85
EQUAÇÃO 64 – FATOR DE ATRITO RELATIVO AO FUNDO. ....	86
EQUAÇÃO 65 – RAIOS HIDRÁULICO RELATIVO AO FUNDO.....	86
EQUAÇÃO 66 – DIÂMETRO ADIMENSIONAL DA PARTÍCULA.....	86
EQUAÇÃO 67 – COEFICIENTE DE CHÉZY. ....	86
EQUAÇÃO 68 – VELOCIDADE DE ATRITO RELATIVA AOS GRÃOS.....	86
EQUAÇÃO 69 – VELOCIDADE DE ATRITO CRÍTICA.....	87
EQUAÇÃO 71 – DESCARGA DE FUNDO.....	87
EQUAÇÃO 73 – DESVIO PADRÃO GEOMÉTRICO DO MATERIAL DE FUNDO. ....	88
EQUAÇÃO 74 – DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO. ....	88
EQUAÇÃO 75 – VELOCIDADE DE QUEDA DO SEDIMENTO UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE STOKES.....	88
EQUAÇÃO 76 - VELOCIDADE DE QUEDA DO SEDIMENTO UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE ZANKE. ....	88
EQUAÇÃO 77 VELOCIDADE DE QUEDA DO SEDIMENTO UTILIZANDO A EQUAÇÃO PROPOSTA POR VAN RJJIN.....	89
EQUAÇÃO 78 – VELOCIDADE DE ATRITO RELATIVO NO FUNDO.....	89
EQUAÇÃO 83 – FATOR DE CORREÇÃO DA CARGA DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO. ....	90
EQUAÇÃO 84 – DESCARGA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.....	90
EQUAÇÃO 85 – DESCARGA TOTAL.....	90
EQUAÇÃO 86 - DESCARGA TOTAL EM TON/DIA.....	90
EQUAÇÃO 87 – INTENSIDADE DE ATRITO PARA CADA FRAÇÃO INDIVIDUAL DE GRÃO. ....	91
EQUAÇÃO 88 - INTENSIDADE DE ATRITO PARA CADA FRAÇÃO INDIVIDUAL DE GRÃO.....	92

EQUAÇÃO 89 – PRODUTO DO RAI0 HIDRÁULICO PELA DECLIVIDADE DA LINHA DE ENERGIA.....	92
EQUAÇÃO 90 - ESPESSURA DA SUBCAMADA LIMITE LAMINAR. ....	92
EQUAÇÃO 91 – VELOCIDADE DE ATRITO RELATIVA AOS GRÃOS. ....	92
EQUAÇÃO 92 – DESCARGA DE FUNDO PARA CADA FRAÇÃO DE DIÂMETRO. ....	94
EQUAÇÃO 93 – PARÂMETRO D' UTILIZADO NA EQUAÇÃO DE DESCARGA DE FUNDO. ....	94
EQUAÇÃO 94 – DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO, EM PESO POR UNIDADE DE LARGURA. ....	94
EQUAÇÃO 95- PARÂMETRO E' UTILIZADO NO CÁLCULO DE CARGA EM SUSPENSÃO. ....	94
EQUAÇÃO 96 – PERÍMETRO DA SEÇÃO. ....	95
EQUAÇÃO 97 – DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ROUSE PARA CADA FRAÇÃO DE DIÂMETRO. ....	95
EQUAÇÃO 98 – PARÂMETRO I1 ....	95
EQUAÇÃO 99 – PARÂMETRO J1' ....	95
EQUAÇÃO 100 – PARÂMETRO J2' ....	95
EQUAÇÃO 101 – PARÂMETRO E1.....	95
EQUAÇÃO 102 – RELAÇÃO DO VALOR Z' PARA O DIÂMETRO DE GRÃO DOMINANTE NA CARGA EM SUSPENSÃO .....	96
EQUAÇÃO 103 – VELOCIDADE DE QUEDA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE RUBEY.....	96
EQUAÇÃO 104 - PARÂMETRO I2.....	96
EQUAÇÃO 105 – CARGA TOTAL DE SEDIMENTOS PARA SEDIMENTOS FINOS. ....	97
EQUAÇÃO 106 - CARGA TOTAL DE SEDIMENTOS PARA SEDIMENTOS GROSSOS. ....	97
EQUAÇÃO 107 – DESCARGA SÓLIDA MEDIDA.....	101
EQUAÇÃO 108 – DESCARGA DE FUNDO NÃO AMOSTRADO.....	101
EQUAÇÃO 109 – CONCENTRAÇÃO RELATIVA. ....	101
EQUAÇÃO 110 – RAZÃO DA EFICIÊNCIA. ....	102
EQUAÇÃO 111- FATOR DE CORREÇÃO K.....	102
EQUAÇÃO 112 – DESCARGA SÓLIDA NÃO MEDIDA. ....	102
EQUAÇÃO 113 – DESCARGA SÓLIDA TOTAL.....	103
EQUAÇÃO 62 - ÍNDICE DE DISPERSÃO .....	105
EQUAÇÃO 63 - ERRO MÉDIO NORMALIZADO .....	105
EQUAÇÃO 64 - FATOR MÉDIO DE ESTIMATIVA.....	105

EQUAÇÃO 117 – CURVA-CHAVE OBTIDA NO PERÍODO 2014/2015.....	119
EQUAÇÃO 118 – CURVA-CHAVE PARA QSS OBTIDA NO PERÍODO 2014/2015.....	120
EQUAÇÃO 121 – CURVA-CHAVE PARA QST OBTIDA NO PERÍODO 2014/2015.....	122
EQUAÇÃO 120 – CURVA-CHAVE OBTIDA NO PERÍODO 2007/2015.....	130
EQUAÇÃO 121 – CURVA-CHAVE PARA CSS OBTIDA NO PERÍODO 2007/2015.....	134
EQUAÇÃO 122 – CURVA-CHAVE PARA QSS OBTIDA NO PERÍODO 2007/2015.....	138
EQUAÇÃO 123 – CURVA-CHAVE OBTIDA NO PERÍODO 2007 A 2015.....	142
EQUAÇÃO 124 – CURVA-CHAVE OBTIDA NO PERÍODO 2007/2015.....	144
EQUAÇÃO 125 – CURVA-CHAVE OBTIDA NO PERÍODO 2007/2015.....	145
EQUAÇÃO 126 – CURVA-CHAVE PARA QSS OBTIDA NO PERÍODO COM PLANTIO DE 2007/2015.....	147
EQUAÇÃO 127 – CURVA-CHAVE PARA CSS OBTIDA NO PERÍODO SEM PLANTIO DE 2007/2015.....	149
EQUAÇÃO 128 – CURVA-CHAVE PARA QSS OBTIDA NO PERÍODO COM PLANTIO DE 2007/2015.....	151
EQUAÇÃO 129 – CURVA-CHAVE PARA QSS OBTIDA NO PERÍODO SEM PLANTIO DE 2007/2015.....	152
EQUAÇÃO 130 – CURVA-CHAVE PARA QST OBTIDA NO PERÍODO COM PLANTIO DE 2007/2015.....	154
EQUAÇÃO 131 – CURVA-CHAVE PARA QST OBTIDA NO PERÍODO SEM PLANTIO DE 2007/2015.....	155



## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	área da seção transversal ao escoamento e valor do número de Froude em movimento inicial no método de Ackers e White (1973);
a	nível de referência abaixo do qual o transporte é considerado de fundo;
a'	fração profundidade não amostrada;
AGU	<i>American Geophysical Union</i>
B	largura da seção transversal;
C	concentração em peso por unidade de volume;
C	a concentração de sedimentos do material de leito (ppm) no método de Ackers e White (1973) e concentração medida de sedimentos em suspensão no método de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955);
C'	coeficiente de Chézy relativo as grãos;
CA	coeficiente da função de transporte de sedimento no método de Ackers e White(1973);
Ca	concentração de referência;
CESP	Companhia Energética de São Paulo;
Cr	concentração relativa em ppm no método de Colby (1957);
Css	concentração média de sedimentos em suspensão em mg/l;
Cssa	concentração média de sedimentos em suspensão ascendente em mg/l;
Cssd	concentração média de sedimentos em suspensão descendente em mg/l;
CV	Coeficiente de variação em %
C's	concentração de sedimentos em suspensão medida em ppm no método de Colby (1957);
CT	concentração total no método de Yang (1973);
D	diâmetro médio de uma faixa de diâmetros;
Dm	diâmetro médio do material de fundo;
d	profundidade média do escoamento;

dh	profundidade hidráulica;
dv	a profundidade média nas verticais de amostragem;
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia elétrica
8º DISME	8º distrito de meteorologia
D*	diâmetro adimensional da partícula, no método de Van Rijn (1984);
D05	diâmetro da partícula para o qual 05% do material do leito são mais finos;
D10	diâmetro da partícula para o qual 10% do material do leito são mais finos;
D16	diâmetro da partícula para o qual 16% do material do leito são mais finos;
D35	diâmetro da partícula para o qual 35% do material do leito são mais finos;
D50	diâmetro da partícula para o qual 50% do material do leito são mais finos;
D65	diâmetro da partícula para o qual 65% do material do leito são mais finos;
D84	diâmetro da partícula para o qual 84% do material do leito são mais finos;
D90	diâmetro da partícula para o qual 90% do material do leito são mais finos;
Dgr	diâmetro adimensional da partícula, no método de Ackers e White (1973);
Di	diâmetro médio do grão;
Dm	diâmetro médio do material de fundo;
Ds	diâmetro das partículas em suspensão no método de Van Rijn (1984);
Eam	eficiência de amostragem do equipamento;
e	razão de eficiência no método de Colby (1957);
f	fator de atrito;
fw	fator de atrito relativo às paredes;
F	fator de correção da carga de sedimento em suspensão no método de Van Rijn (1984);

FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária
fb	fator de atrito relativo ao fundo;
Fgr	mobilidade da partícula, no método de Ackers e White (1973);
fw	fator de atrito relativo às paredes;
g	aceleração da gravidade;
Ggr	descarga sólida adimensional no método de Ackers e White (1973);
gs	descarga sólida total no método de Engelund e Hansen (1967) em kgf/m.s;
H	Cota do nível da água
iB	porcentagem do material de leito correspondente ao diâmetro Di;
ID	índice de dispersão
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K	fator de conversão de unidades (0,0864), constante de Von Kármán e fator de correção no método de Colby (1957);
K1	fator de correção dos efeitos de temperatura sobre a descarga de arrasto;
K2	fator de correção em função da profundidade e concentração de sedimentos finos;
K3	fator de correção do diâmetro da partícula fora do intervalo granulométrico;
Kr	coeficiente de rugosidade;
Ks	altura da rugosidade equivalente de NIKURADSE;
Kst	coeficiente de rugosidade de Stricker;
is	fração do material em suspensão de diâmetro Di;
Dsi	fração por peso da granulometria de sedimento;
L	largura da seção transversal;
l	Largura da boca do amostrador;
DIF	Diferença percentual relativa;
ID	Índice de dispersão;
LASED	Laboratório de Sedimentos;
LCEC	Laboratório CESP de Engenharia Civil;
m	Expoente da função de transporte de sedimento no método de

	Ackers e White (1973)
$m_5$	Fator de correção das sinuosidades do canal
MNE	Erro médio normalizado para o Índice de dispersão de Aguirre 2004
MPF	Fator médio de estimativa para o Índice de dispersão de Aguirre 2004
MO	Matéria orgânica
$n$	Coeficiente de Manning
$n$	Número de pontos amostrados;
$n$	Expoente de transição que depende da granulometria do sedimento o método de Ackers e White (1973)
$n_0$	Valor básico de $n$ para um canal reto, uniforme e liso, livre de materiais naturais envolvidos
$n_1$	Valor adicional a $n_0$ , para correção dos efeitos das irregularidades da superfície
$n_2$	Valor para variações na forma e tamanho do canal através da seção
$n_3$	Valor para obstruções; e condições de escoamento
$n_4$	é o valor para a vegetação
$P_m$	perímetro molhado da seção;
$p$	peso seco da amostra total;
Pot	potência de escoamento
$Q$	descarga líquida da seção;
$Q_b$	descarga de fundo no método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955);
$q$	descarga líquida por unidade de largura do canal;
$q_b$	descarga de arrasto no método de Van Rijn e descarga total de sedimentos por unidade de largura pelo método de Cheng (2002);
$Q_{sa}$	descarga de sedimentos de fundo;
$Q_{sf}$	descarga de sedimentos de fundo
$Q_{ss}$	descarga de sedimentos em suspensão
$Q_{ssa}$	descarga de sedimentos em suspensão ascendente



Qssd	descarga de sedimentos em suspensão descendente
Qst	descarga total de sedimentos medida;
Qnm	descarga sólida não amostrada no método de Colby (1957);
Qs	descarga de sedimentos em suspensão;
Qsm	descarga sólida medida no método de Colby (1957);
Qsa	descarga sólida de arraste total na seção transversal;
Qsi	descarga sólida de areias;
q`si	descarga de areias não corrigidas;
qs`i	descarga sólida em suspensão, em peso por unidade de largura;
qsa	descarga sólida unitária do leito;
Qst	descarga sólida total no método de Colby (1957) e Cheng (2002);
QsT	descarga sólida total (ton/dia);
Qsta	descarga sólida total ascendente(ton/dia);
Qstd	descarga sólida total descendente(ton/dia);
qT	descarga total de sedimentos;
r	Coefficiente de correlação de Pearson;
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
Rh	raio hidráulico;
Rb	raio hidráulico relativo ao fundo;
Rey	parâmetro adimensional dado pela relação entre a força de inércia e a força viscosa;
Reyb	número de Reynolds relativo ao fundo;
Reyw	número de Reynolds relativo às paredes;
Rh	raio hidráulico da seção;
Rw	raio hidráulico relativo às paredes;
R'.S	produto do raio hidráulico pela declividade da linha de energia;
S	declividade da linha d'água;
γs	densidade do sedimento;
T	parâmetro de transporte que expressa à mobilidade da partícula no método de Van Rijn (1984) e coeficiente de atrito com o fundo
t	tempo de amostragem;
U	velocidade média do escoamento;
u*	velocidade de atrito da corrente e velocidade de atrito relativa aos

	grãos;
U*	velocidade de atrito relativo aos grãos no método de Ackers e White (1973);
U*	velocidade de atrito relativa aos grãos;
u*cr	velocidade de atrito crítica;
u**	velocidade de atrito relativo aos grãos no método de Van Rijn (1984);
u*	velocidade de cisalhamento relativa ao fundo;
u*Cr	velocidade de cisalhamento crítica de acordo com Shields;
Uc	velocidade crítica do escoamento, no movimento incipiente;
ucr	velocidade de atrito crítica no método de Van Rijn (1984);
Ucr	Velocidade média crítica do escoamento;
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria;
US-BL-84	Amostrador de descarga sólida de arraste;
X	Fluxo de massa de sedimentos por vazão líquida em massa;
x	Fator de correção da distribuição logarítmica da velocidade;
Xmi	Valores medidos das variáveis hidráulicas para o índice de dispersão de Aguirre 2004
Xci	Valores calculados das variáveis hidráulicas para o índice de dispersão de Aguirre 2004
Vm	velocidade média do escoamento;
W	velocidade de queda da partícula de sedimento em suspensão;
w	velocidade de sedimentação da partícula;
Z	parâmetro de suspensão no método de Van Rijn;
Z'	expoente da distribuição da concentração de Rouze (1937) para cada fração granulométrica;
$\Delta$	altura das formas de fundo no método de Van Rijn (1984) e 1,65 no método de Karim (1998);
$\beta$	coeficiente relacionado à difusão das partículas de sedimento;
$\alpha$	coeficiente, no método de Ackers e White (1973);
$\phi$	fator de influência das partículas na estrutura do fluido turbulento no método de Van Rijn (1984) e parâmetro adimensional de transporte de Einstein;

$\rho$	massa específica da água
$\rho_s$	massa específica do sedimento;
$\gamma$	peso específico da água;
$\gamma_s$	peso específico do sedimento;
$\psi$	potência da corrente;
$\nu$	viscosidade cinemática da água;
$\theta_{cr}$	parâmetro de mobilidade crítica no método de Van Rijn (1984) e parâmetro adimensional da tensão de atrito no método de Cheng (2002);
$\theta$	parâmetro adimensional da tensão de atrito;
$\Phi$	parâmetro adimensional de transporte no método de Cheng (2002);
$\tau_o$	tensão de atrito no leito do canal;
$\sigma_s$	desvio padrão geométrico do material de leito.
$\alpha$	coeficiente, que no regime turbulento é igual a 10;
$\psi$	intensidade de atrito para cada fração granulométrica do grão;
$\delta$	espessura da subcamada limite laminar;
$\phi^*$	intensidade de transporte de arrosto;
$\sigma_s$	desvio padrão geométrico da amostra de sedimento;
$\gamma_c$	coeficiente relaciona as forças tangenciais críticas com os diâmetros do sedimento.
$\mu$	Média estatística
$\sigma$	Desvio padrão estatístico



# SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	39
2 OBJETIVO.....	41
2.1 OBJETIVO GERAL.....	41
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	41
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	43
3.1 PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	43
3.2 FATORES QUE AFETAM O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	43
3.3 ESTIMATIVAS DA DESCARGA SÓLIDA DE SEDIMENTOS EM RIOS .....	44
3.4 VARIABILIDADE DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS .....	46
3.5 ALGUNS ESTUDOS SOBRE O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS JÁ REALIZADOS .....	47
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	55
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	55
4.2 MONITORAMENTO QUANTITATIVO .....	61
4.3 EQUIPAMENTOS E ENSAIOS LABORATORIAIS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS SEGUNDO CARVALHO (2008).....	62
4.3.1 Equipamentos para amostragem de sedimentos .....	62
4.3.2 Ensaios Laboratoriais utilizados para caracterização dos sedimentos.....	64
4.4 ESTIMATIVAS INDIRETAS DOS SEDIMENTOS TRANSPORTADOS NA SEÇÃO .....	67
4.4.1 Métodos indiretos de cálculo da descarga sólida de arrasto e de material de leito.....	68
4.4.2 Descrição dos métodos indiretos de cálculo da descarga sólida, de acordo com Paiva (1988), Scapin (2005) e Rizzardi (2013).....	69
4.5 AVALIAÇÃO TEMPORAL DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA SEÇÃO.....	103
4.5 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES SOBRE A DESCARGA LÍQUIDA E NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	104
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	105
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
5.1 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS E GEOMÉTRICAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO VACACÁI MIRIM .....	107
5.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS.....	112
5.3 CURVA-CHAVE.....	118
5.3.1 Curva chave da descarga líquida obtida no período de 2014/2015 .....	118
5.3.2 Curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão, obtida no período de 2014/2015 .....	120
5.3.3 Curva-chave da descarga de sedimentos total, obtida no período de 2014/2015.....	122

5.4 CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO, OBTIDA NO PERÍODO DE 2014/2015 .....	124
5.5 DESCARGA SÓLIDA TOTAL MENSAL .....	126
5.5.1 Descarga sólida total mensal do período de outubro de 2014 a dezembro de 2015 .....	126
5.6 - DESCARGA SÓLIDA MEDIDA EM SUSPENSÃO E DE FUNDO.....	127
5.7 AVALIAÇÃO TEMPORAL .....	128
5.7.1 Curva-Chave da descarga líquida para cada período.....	128
5.7.2 Curva-Chave única da descarga líquida período de 2007 a 2015.....	130
5.8 CURVA-CHAVE DA DESCARGA DE SEDIMENTOS .....	132
5.8.1 Concentração de sedimentos em suspensão para períodos distintos.....	132
5.8.2 Curva-chave da concentração de sedimentos em suspensão em um único período.....	134
5.8.3 Curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão em períodos separados .....	136
5.8.4 Curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão em um único período.....	138
5.8.5 Curva-chave da descarga total de sedimentos em períodos separados.....	140
5.8.6 Curva-chave única da descarga total de sedimentos para todo o período .....	142
5.9 INFLUÊNCIAS DA RETIRADA DE ÁGUA PARA CULTIVO E ÉPOCAS DE PREPARO DO SOLO PARA PLANTIO.....	143
5.9.1 Curva Chave período de plantio orizicola .....	143
5.9.2 Curva chave do período sem plantio de arroz (abril a setembro) .....	145
5.9.3 Curva chave da C <sub>ss</sub> do período com plantio de arroz (outubro a março).....	147
5.9.4 Curva chave da C <sub>ss</sub> do período sem plantio de arroz (abril a setembro).....	149
5.9.5 Curva chave da Q <sub>ss</sub> do período com plantio de arroz (outubro a março).....	151
5.9.6 Curva chave da Q <sub>ss</sub> do período sem plantio de arroz (abril a setembro) .....	152
5.9.7 Curva chave da Q <sub>st</sub> do período com plantio de arroz .....	154
5.9.8 Curva chave da Q <sub>sT</sub> do período sem plantio de arroz.....	155
5.10 AVALIAÇÃO TEMPORAL DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL MENSAL .....	157
5.10.1 Descarga sólida total mensal de 2007 a 2015 .....	158
5.11 AVALIAÇÕES DOS MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SEUS EFEITOS NAS DESCARGAS LÍQUIDAS E SÓLIDAS. ....	163
5.12 AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULOS PARA ESTIMAR O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO RIO VACACAÍ MIRIM .....	166
5.12.1 Estimativa e comparação com resultados anteriores, referente ao transporte de sedimentos na seção.....	166
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	173
REFERÊNCIAS .....	175

## INTRODUÇÃO

O monitoramento dos eventos de cheia proporciona o estudo do escoamento gerado durante as chuvas, assim como, a produção e o transporte de sedimentos em bacias rurais e urbanas propiciando dados de campo para futuras aplicações. A relevância do monitoramento hidrossedimentológico para a agricultura está na avaliação da perda de solo por processos erosivos, em virtude do impacto das gotas de chuva sobre áreas agrícolas mais susceptíveis a erosão laminar e subsuperficial. Esses processos erosivos podem ser ocasionados por práticas de manejo inadequadas, tais como, quantidade de palhada insuficiente para cobertura do solo no plantio direto, não cumprimento das leis ambientais referentes às áreas de preservação permanente, ou seja, retirada da mata que recobre as margens de rios e das áreas declivosas.

Os processos de erosão e sedimentação em uma bacia hidrográfica ocasionam inúmeros problemas. Em áreas agrícolas, por exemplo, a erosão remove a camada superficial do solo, reduzindo principalmente a sua camada fértil, acarretando a diminuição da produtividade do solo e das culturas. Desse modo, o sedimento é carregado para jusante das bacias chegando aos corpos hídricos, prejudicando a qualidade das águas superficiais dentre outros fatores ambientais e econômicos.

O conhecimento da quantidade de sedimentos transportado pelos rios é importante para o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos, pois os danos ocasionados pelos sedimentos dependem da quantidade e da natureza dos mesmos, os quais por sua vez dependem dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos (PAIVA e PAIVA, 2003). Em relação à produção de sedimentos, esta pode ocasionar o assoreamento de corpos d'água, acarretando diversos problemas, tais como, redução na navegabilidade, aumento de áreas de alagamento e inundações, gastos com dragagens, contaminação de corpos hídricos por sedimentos devido a adsorção dos contaminantes nos sedimentos. Esses contaminantes adsorvidos no sedimento provocam perdas no aproveitamento para abastecimento humano e uso da água para irrigação).

Os resultados obtidos no monitoramento podem ser utilizados na modelagem hidrossedimentológica, gerando informações para previsões de impactos da expansão da agricultura, uso e ocupação do solo, na qualidade e quantidade de águas superficiais e subterrâneas. Portanto, torna-se possível a adoção de medidas preventivas ou paliativas que visem minimizar a perda de solo por processos erosivos, sejam estes, ocasionados pelo uso inadequado do solo ou pela ocupação inadequada do ambiente urbano.

O monitoramento hidrossedimentológico é uma ferramenta de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, pois, por meio do conjunto de dados obtidos em campo, é possível a construção de cenários futuros da área avaliada. Destaca-se que a carência de informações sedimentológicas leva à necessidade de trabalhos experimentais, implicando na demanda de avaliar temporalmente as relações entre as descargas sólidas e líquidas, assim como, o transporte de sedimentos nos rios.

Diante do exposto, as avaliações temporais da quantidade de sedimentos transportados pode contribuir para o auxílio na tomada de decisões para um melhor gerenciamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim.



## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este estudo visa avaliar a variação temporal do transporte de sedimentos em suspensão e as frações granulométricas dos sedimentos de leito, assim como, do material de arraste no rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca/RS.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Determinar a concentração dos sedimentos em suspensão transportados nos eventos monitorados, na secção transversal do rio Vacacaí Mirim, localizada no município de Restinga Sêca/RS.

Determinar as frações granulométricas dos sedimentos de leito e do material de arraste para os eventos considerados;

Estimar, por meio de métodos indiretos, a descarga sólida em suspensão, descarga sólida de arrasto e a descarga sólida total;

Relacionar a descarga sólida com o uso do solo na bacia, épocas do ano e tipos de preparo do solo para cultivo;

Avaliar métodos de cálculo de transporte de sedimentos com os dados observados.



## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Processos erosivos em bacias hidrográficas**

A erosão do solo é provocada pela chuva e vento, este é um dos principais processos causadores de modificações na paisagem e ocasiona prejuízos produtivos a cultivos agrícolas devido à redução da capacidade de produção.

As atividades antrópicas provocam a alteração das propriedades físicas do solo resultando em impactos aos recursos naturais (solo, água e biodiversidade).

As alterações na estrutura do solo provocam mudanças nas taxas de infiltração de água no solo, sendo que esta tem forte relação com a ocorrência de enxurradas. A presença de áreas ambientalmente frágeis junto ao uso inadequado do solo, leva a uma degradação ambiental e uma perda de valor para uso agrícola, causando problemas socioeconômicos para as pessoas que dependem da terra (BARROS, 2012).

A expansão de cultivos agrícolas devido a ações do homem, como desmatamento, uso inadequado do solo e práticas conservacionistas inadequadas, favorecem os processos erosivos que resultam na degradação das bacias hidrográficas. Estas interferências no meio ocasionam o favorecimento do transporte de solo nas bacias.

### **3.2 Fatores que afetam o transporte de sedimentos**

De acordo com Megahan (1999) o transporte durante um evento de alto fluxo é em sua maioria, de sedimentos que se encontram prontamente disponíveis para o transporte conforme ocorre o aumento de fluxo. Ocorre defasagem durante o evento quando os sedimentos não estão imediatamente disponíveis ou quando aqueles gerados em pontos mais distantes levam um tempo maior que o escoamento para chegar às estações de medição. Tanto a disponibilidade local como o abastecimento de sedimentos a montante das

estações de medição são influenciados pela história antecedente de fluxo ao longo do rio.

Seeger et al. (2004) e Zabaleta et al. (2007) analisaram a relação entre as características das bacias hidrográficas, os fatores que atuam na vazão de um evento e a concentração de sedimentos em suspensão em rios. Constataram que as análises da interação da quantidade de sedimentos produzidos durante um evento chuvoso e as características da vazão podem ajudar no entendimento dos processos que atuam no transporte e deposição de sedimentos. Segundo Williams (1989) as concentrações de sedimentos e as vazões em um rio são influenciadas pela intensidade das precipitações e por sua distribuição na bacia hidrográfica.

Vários fatores podem influenciar a relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a vazão, podendo-se destacar a intensidade da chuva, a variação temporal e diferentes tipos de uso do solo. Estes fatores podem beneficiar ou dificultar a ocorrência dos processos erosivos, as condições de umidade e descarga que influenciam na quantidade de sedimento a ser fornecida por erosão das vertentes e do canal (REID et al., 1997).

### **3.3 Estimativas da descarga sólida de sedimentos em rios**

A estimativa da descarga sólida em corpo d' água pode ser feita de modo indireto e direto, através métodos de cálculo e medições em campo, respectivamente. Existem vários métodos de cálculo que avaliam a descarga de sedimentos proveniente do leito do rio. Alguns métodos estimam a quantidade de sedimentos transportada pelo escoamento de maneira indireta, ou seja, a partir de parâmetros hidráulicos da corrente em uma seção do rio, como também das características do material do leito do rio.

Os métodos indiretos amplamente utilizados em estudos sedimentológicos são: Meyer-Peter e Muller (1948), Van Rijn (1984), Karim (1988), Cheng (2002) para descarga sólida de arraste de fundo; Laursen (1958), Engelund e Hansen (1967), Toffaleti (1969), Yang (1973), Ackers e White (1973) para a descarga sólida em suspensão e Einstein modificado por Colby e

Hembree (1955) e Método simplificado de Colby (1957) para descarga sólida total.

Paiva (1988) a partir de 22 medições no rio Mogi Guaçu e 353 séries de dados experimentais dos canais do Paquistão, avaliou 16 métodos de estimativa disponíveis. O autor concluiu que dentre os métodos de estimativa indireta da descarga total de material de leito avaliados, os melhores resultados foram apresentados pelo Método de Yang (1973), seguido pelos métodos de Toffaleti (1969), Bishop (1965), Ackers e White (1973) e Van Rijn (1984) que mostraram desempenhos semelhantes.

Scapin (2007) concluiu que nenhum dos métodos de estimativa da descarga de fundo testados, Meyer Peter e Müller (1948), Einstein (1950), Van Rijn (1984) e Cheng (2002), foi capaz de estimar descarga de fundo medida com precisão aceitável, em pesquisa realizada no arroio Cancela, na cidade de Santa Maria, RS. O menor índice de dispersão foi obtido pelo Método de Meyer Peter e Muller e seu valor foi  $ID=133$ , ou seja, 13,3 vezes maior que o maior valor aceitável.

Crispim et al. (2015) obteve em seu estudo realizado no rio Piranhas, com a utilização da equação de Meyer-Peter & Müller, que esta pode não ter uma precisão adequada, possivelmente devido a problemas na calha do rio com a retirada de materiais (dragagem para extração de areia). No entanto, foi possível mensurar a descarga sólida de leito dentro de valores bem aceitáveis.

Mais recentemente Durafour et al. (2014) utilizou os resultados obtidos in situ, comparando com as previsões dos fluxos totais por modelos clássicos de cálculo de sedimento de leito. Fairbank et al. (2015) utilizou técnicas de medição como SEMEP (série do método de Einstein modificado) para estimar a descarga sólida total.

De acordo com Carvalho (2008) a descarga em suspensão representa a maior parte da carga sólida em um curso d'água, podendo corresponder a 95% de toda a descarga sólida. No entanto, a descarga em suspensão é variável de acordo com o curso d' água e posição da seção transversal (montante ou jusante), estando em função da velocidade, tipo de escoamento, profundidade, granulometria dentre outros fatores.

Em relação ao modo direto, a estimativa é realizada a partir da medição direta da concentração de sedimentos em suspensão, das características hidráulicas da seção ou trecho de rio e também das características do material de fundo (RIZZARDI, 2013).

### **3.4 Variabilidade do transporte de sedimentos em rios**

O transporte de sedimentos, principalmente do sedimento em suspensão, apresenta variabilidade temporal podendo ser maior ou menor, dependendo da descarga líquida. Os sistemas fluviais se tornam mais eficientes no que se refere ao transporte de sedimentos e carga dissolvida à medida que aumenta a vazão (LELI, 2011).

Segundo Pitlik (1993) variações na concentração de sedimento são analisadas sob diferentes escalas temporais (horárias, diárias), onde frequentemente ocorre a utilização da descarga anual, quando a intenção é avaliar as alterações no regime das descargas de água e de sedimento, bem como, dos fluxos que alteram a geomorfologia dos canais fluviais.

A variabilidade temporal no transporte de sedimentos é influenciada por diversos fatores, tais como, diferenças do regime climático e estações climáticas do ano (onde ocorrem diferentes volumes de precipitação), características geomorfológicas da área de estudo (tipo de solo, umidade antecedente do solo, variação da cobertura do solo em cultivos anuais) e o regime de uso d' água em áreas agrícolas. Estes fatores estão estreitamente relacionados com a descarga e variação de sedimentos transportados no rio.

De acordo com Minella et al. (2007) a avaliação dos efeitos das práticas conservacionistas do solo, adotadas pelos agricultores, é eficaz no controle da erosão e da variabilidade da produção de sedimentos, ou seja, integração dos fluxos de sedimentos em suspensão dentro de um intervalo de tempo.

O estudo da variação temporal no transporte de sedimento em canais fluviais proporciona a avaliação do transporte e deposição do sedimento ao longo de um período. Tal estudo pode indicar se as atividades antrópicas, como alterações no uso e ocupação do solo, fatores climáticos e geomorfológicos provocaram a variação na quantidade de sedimento, permitindo realizar

previsões para tomadas de decisão que visem a melhoria ou manutenção de atividades desenvolvidas nos corpos hídricos.

### 3.5 Alguns estudos sobre o transporte de sedimentos já realizados

São apresentados no quadro 1, de modo sucinto, a descrição dos resultados obtidos em alguns estudos do transporte de sedimentos em rios, realizados no Brasil.

Quadro 1 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos do transporte de sedimentos em rios, realizados no Brasil

Autor	Resultados
Braga et al (2012)	<p><b>Local:</b> Bacia hidrográfica da usina hidrelétrica (UHE) da Barra dos Coqueiros, no estado de Goiás, amostragens realizadas nos afluentes do reservatório UHE de março a agosto de 2011, com 6 coletas de dados referente ao final do período chuvoso e ao período de estiagem.</p> <p><b>Resultados:</b> A avaliação da distribuição espacial e temporal da concentração de sólidos em suspensão dos principais afluentes do reservatório da UHE Barra dos Coqueiros o Córrego Matriz destacou-se entre os afluentes analisados, por apresentar maiores concentrações de sólidos em suspensão (variaram de 2,5 mg/L no período seco a 14,5 mg/L no período chuvoso), maiores vazões, maiores velocidade da correnteza da água, baixa profundidade, maior largura e maior descarga sólida total calculada pelo método de Colby, entre os afluentes avaliados.</p>
Chella et al (2005)	<p><b>Local:</b> Bacia do rio Barigui, se localiza no Primeiro Planalto Paranaense, na Região Metropolitana de Curitiba/PR. A bacia do rio apresenta cobertura vegetal pouco significativa, ao norte da bacia, são encontradas pequenas áreas com vegetação densa. No município de Curitiba, a bacia encontra-se quase totalmente urbanizada, com exceção da porção sul, onde aparecem importantes áreas de inundação. As coletas realizaram nos meses de fevereiro a outubro de 2004.</p> <p><b>Resultados:</b> As concentrações de sólidos totais e suspensos mantiveram-se nas mesmas ordens de grandeza nos dois estudos utilizados para avaliar a variação temporal, evidenciando que a dinâmica do rio Barigui permaneceu estável desde o ano de 2002. As curvas de descarga sólida apresentaram variações nos coeficientes de correlação.</p>
Crispim et al. (2015)	<p><b>Local:</b> Bacia hidrográfica do rio Piranhas, próxima a cidade de cidade de Pombal-PB. As coletas realizaram-se 06/03/2012 a 22/06/2012 com oito medições de descarga líquida e de sedimentos de fundo.</p> <p><b>Resultados:</b> A equação de Meyer-Peter &amp; Müller produziu resultados que aparentemente seguiram a variação da granulometria dos sedimentos do leito do rio; Equações para a estimativa do transporte de sedimentos no rio podem não ter uma precisão adequada devido a problemas na sua calha fluvial.</p>

Quadro 1 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos do transporte de sedimentos em rios, realizados no Brasil (Continuação)

Autor	Resultados
Depiné et al. (2011)	<p><b>Local:</b> Bacia hidrográfica do rio ribeirão Concórdia, localizada no estado de Santa Catarina, esta bacia apresenta uso predominante agrícola. Foram realizadas 24 coletas em eventos de cheias no período de janeiro de 2008 a outubro de 2009.</p> <p><b>Resultados:</b> As cargas de sedimentos em suspensão em três estações fluviométricas monitoradas foram diferentes, sendo assim, não refletiram a evolução espacial proporcional à área de drenagem; A seção fluviométrica intermediária obteve os maiores valores médios de concentração e na seção de montante os valores obtidos foram mais baixos; As diferenças espaciais na bacia hidrográfica influenciaram significativamente as concentrações de sedimentos em suspensão obtidas no escoamento fluvial.</p>
Ferreira et al. (2013)	<p><b>Local:</b> Bacia hidrográfica do rio Piranhas, inserida na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas Açú, situada no nordeste do Brasil e pertencente aos estados de Rio Grande do Norte e Paraíba. Foram realizadas 17 campanhas de novembro de 2012 a agosto de 2013</p> <p><b>Resultados:</b> A concentração de sedimentos em suspensão apresentou altas concentrações (161,99 mg/L) no período de chuvas e baixas concentrações (2,53 mg/L) no período de estiagem. A descarga sólida em suspensão e total na bacia do rio Piancó Piranhas Açú demonstrou bom ajuste aos níveis de vazões e produção específica de sedimentos em suspensão, correspondente a 1,13 t/km<sup>2</sup>.ano, no entanto, essas variações foram mais evidentes no período chuvoso e provavelmente relacionam-se às atividades antrópicas desenvolvidas na área da bacia.</p>
Leli et al. (2011)	<p><b>Local:</b> Bacia hidrográfica do rio Ivaí, localizada na região sul do Brasil no estado do Paraná. Foram realizadas análise do comportamento de sedimentos em suspensão de 30 anos (1977 a 2007).</p> <p><b>Resultados:</b> A relação entre a concentração de sedimento em suspensão e a descarga de água não apresentou boa correlação (<math>R^2 = 0,56</math>), evidenciando o efeito de histerese. A justificativa para esse comportamento é dada pelo regime hidrológico heterogêneo e pela ocupação da bacia; Não foram observadas alterações significativas nas vazões anuais, pois estas permaneceram as mesmas durante o período estudado (1977-2007); Em relação à descarga de sedimento em suspensão, esta apresentou um pequeno declínio gradual, ou seja, no final do período (2007) o rio transportava 0,65 Mton menos do que no começo (1977), esta redução de sedimento em suspensão transportado foi provavelmente devido à alterações no manejo do solo para o cultivo agrícola.</p>
Paiva et al. (2013)	<p><b>Local:</b> Bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, estações sedimentométrica e fluviométrica localizada no município de Restinga Seca. Foram avaliadas as descargas sólidas para o período de 2007 a 2010 com 30 medições de vazão e 19 com amostragem da concentração de sedimentos em suspensão e do material do leito.</p> <p><b>Resultados:</b> A produção de sedimentos (descarga sólida) no período de 2007 a 2010 foi de 0,09 mm/ano; A produção de sedimentos obtida para o período de 1976 a 2006 foi de 0,06 mm/ano, indicando que houve um aumento nas vazões líquidas na seção considerada, uma vez em que a curva chave de sedimentos utilizada foi a mesma para todos os períodos.</p>



Quadro 1 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos do transporte de sedimentos em rios, realizados no Brasil (Continuação)

Autor	Resultados
Pitilin et al. (2013)	<p><b>Local:</b> A seção de estudo foi o rio Toledo, localizado na cidade de Toledo/PR. Foram avaliadas coletas de julho a setembro de 2012.</p> <p><b>Resultados:</b> A descarga de sedimentos em suspensão obtida foi de 11,70 ton.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>, sendo este considerado baixo quando confrontado com resultados de estudos em outras bacias hidrográficas do Paraná; A baixa descarga de sedimentos em suspensão obtida neste estudo ocorreu principalmente porque parte da área é agrícola e possui manejo para controle de erosões, outra parte está urbanizada, produzindo menos sedimentos e, também, o erro implícito devido o baixo número de amostras obtidas (n=25) e que as mesmas foram obtidas durante o período de recessão do hidrograma.</p>
Santos et al. (2013)	<p><b>Local:</b> bacia hidrográfica do Rio Potengi, situada no nordeste setentrional brasileiro, no Estado do Rio Grande do Norte. Foram utilizados dados de cinco anos ( 1997 a 2001) para análise da suscetibilidade hídrica à erosão através do modelo SWAT</p> <p><b>Resultados:</b> Verificou-se que nas sub bacias mais a oeste da bacia, onde se revelam as nascentes da rede hídrica, a produção de sedimentos é impulsionada, naturalmente, pelas grandes declividades aliadas aos solos frágeis; Para a região leste da bacia os resultados indicaram que, por força de sua própria natureza, essa região não contribuiria significativamente com aporte de sedimentos para o rio Potengi, de forma que a maior parte dos sedimentos produzidos é consequência das atividades antrópicas; Em relação à porção central da bacia, a análise da propagação de sedimentos apontou para um predomínio da deposição em detrimento do transporte, a partir do que se concluiu que muito dificilmente um evento de chuva que ocorra no alto rio Potengi contribuirá significativamente com aporte de sedimento para o estuário do rio.</p>
Vanzela et. al. (2012)	<p><b>Local:</b> Este estudo foi realizado em duas bacias hidrográficas localizadas no município de Fernandópolis /SP, no Noroeste Paulista. Foram monitorados a vazão e o transporte de sedimentos em 26 meses (13/11/2009 a 14/08/2011) com 52 avaliações.</p> <p><b>Resultados:</b> Os resultados obtidos demonstraram que o excedente hídrico influenciou significativamente as vazões específicas e as descargas sólidas específicas na bacia hidrográfica de menor percentual de urbanização; O uso e ocupação do solo influenciou significativamente a concentração de sólidos totais e dissolvidos no período seco e vazão específica nos dois períodos (seco e com excedente hídrico).</p>

Diante do exposto, observa-se que o transporte de sedimentos em uma seção sofre influência do período de tempo seco e do período de chuvas, menores e maiores concentrações, respectivamente. Assim como, pode ser influenciado pelas às atividades antrópicas presentes na bacia hidrográfica, como observado em Ferreira (2013), onde as variações foram mais evidentes no

período chuvoso e provavelmente relacionam-se às atividades antrópicas desenvolvidas na área da bacia.

No quadro 2 apresenta-se, de forma resumida, a descrição dos resultados obtidos em alguns estudos do transporte de sedimentos em rios, realizados em outros países.

Quadro 2 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos de Cálculos de carga de sedimento a partir de medições pontuais realizados no mundo

Autor	Resultados
Ding et al. (2011)	<p><b>Local:</b> Estação hidrológica do Beipei Rio Jialing</p> <p><b>Resultados:</b> As descargas anuais de sedimentos em suspensão foram analisadas para descrever o tendência do rio Jialing ao longo das últimas cinco décadas (1956- 2006). Estas descargas também foram analisadas para determinar a fatores influentes associado com sua variação, com a ajuda da análise de correlação Tau-b de Kendall e análise de regressão. Os resultados indicaram que no Rio Jialing a descarga anual não mostrou significativa tendência em nível de confiança (<math>nc &gt; 95\%</math>), enquanto a descarga anual de sedimentos pareceu ter uma diminuição significativa da tendência ao longo dos últimos 50 anos. Uma diminuição da descarga anual de sedimentos foi particularmente evidente após o ano 1985, no qual ocorreu uma mudança substancial do nível dos sedimentos. Esta mudança é atribuída à construção de numerosas barragens em 1980. No entanto, após o ano de 1985, dois períodos em sequencia (1986-1991 e 1992-2006) com razão entre a descarga de sedimentos e a descarga líquida foram identificados. O período 1992-2006 é caracterizado por uma baixa descarga de sedimentos, o que é mais provavelmente devido a conservação do solo e da água, o que ocorreu no final dos anos 1980.</p>
Aguirre et al. (2006)	<p><b>Local:</b> Dados compostos por 23 canais de laboratório e 8 rios explorados de Hydraulic-Tech. Inc. (1998) e Brownlie (1981)</p> <p><b>Resultados:</b> Os modelos que estimaram mais corretamente o transporte de sedimento de fundo foram o de Englund e Hansen e de Aguirre-Pe et al. com valores médios de Índice de exatidão IE = 2,79 e 6,17, respectivamente. Estes valores baixos são muito satisfatórios para a validação do procedimento. Outros valores no modelo são inapropriados para condições específicas podendo resultar em valores muito altos com o IE = 18609 no caso e de IE = 25037 em outro. Se desenvolveu um método para selecionar modelos de transporte de sedimentos mais adequado para um rio ou canal sob condições hidráulicas específicas, em função dos valores do IE correspondente.</p>
Chalov et al. (2015)	<p><b>Local:</b> Bacia do Rio Selenga, Mongólia e Rússia. Aplicação do modelo HEC - RAS a partir de 62 medições de 2011 e 2012</p> <p><b>Resultados:</b> Os dados de campo e modelagem hidráulica convergem em mostrar que o fluxo de pico de eventos durante a primavera e o verão contribuiu principalmente (70-80%) dos sedimentos e poluição das cargas anuais em partes a montante da bacia. O rio Selenga carrega principalmente lodo e areia. O tamanho médio de partícula difere por um fator de quatro entre enchentes de verão e períodos de fluxo de base. A baixa quantidade de matéria orgânica particulada (variando entre 1 e 16% nos rios estudados) é consistente com o papel significativo de sedimentos provenientes de áreas</p>

Quadro 2 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos de Cálculos de carga de sedimento a partir de medições pontuais realizados no mundo (continuação)

Autor	Resultados
Dang et al. (2010)	<p>de mineração e fontes em canais. O transporte de carga de leito na parte a jusante da bacia hidrográfica é elevada (até 50% do transporte total), e o armazenamento no canal desempenha um importante papel no total do transporte de sedimentos do Lago Baikal. Obtiveram quedas multi-decadal estatisticamente significativas nos fluxos de sedimentos a jusante do rio Selenga. Isso pode ser atribuído ao abandono de terras cultivadas e (mais provável) da alteração dos fatores hidroclimáticos.</p> <p><b>Local:</b> Bacia hidrográfica do Rio Vermelho, localizada na província de Yunnan, na China no Sudeste da Ásia, na China. Foram utilizados dados de uma longa serie de monitoramento (1960 a 2008)</p> <p><b>Resultados:</b> A partir de curvas chaves de sedimento, onde a concentração de sedimento em suspensão (<math>SPM = aQ^b</math>). Os Parâmetros de avaliação de sedimentos(a e b) pré e pós-1989 sugere uma redução de valores do parâmetro- b depois de 1989, atribuída a uma diminuição do aporte de sedimentos devido ao comissionamento da barragem Hoa Binh. Uma unica curva de classificação sedimento foi derivada dos dados de 1960-1989 sendo utilizada para simular a variabilidade anual de sedimentos, gerando excelentes estimativas de fluxo cumulativas Dentro de contraste, aplicando a mesma curva de classificação para os dados 1990-2008 resultou em sistemática, substancial e superestimada. Isto sugere que a represa Hoa Binh reduz entrega anual do material particulado em suspensão (SPM) para o delta pela metade, implicando no armazenamento atrás da represa Hoa Binh.</p>
Durafour et al. (2014)	<p><b>Local: Canal da Mancha entre Inglaterra e França.</b></p> <p><b>Resultados:</b> Foi instalado um grande painel de instrumentos no Canal da Mancha oriental Inglês para medir a evolução dos fluxos de sedimentos de leito durante um ciclo de maré para dois locais diferentes. O primeiro foi caracterizado por uma sedimento arenoso, com uma dispersão baixa, enquanto o outro local de estudo apresentou uma grande faixa de sedimentos graduados com tamanhos de grão que variam de areias finas até grânulos. Os resultado in situ obtidos foram comparados com as previsões do total de descarga de sedimento de leito por modelos clássicos. A Boa concordância foi encontrada para sedimentos homogêneas com estas fórmulas. No caso do tamanho de sedimentos heterogêneos, a abordagem utilizada envolveu um coeficiente de escondimento e um fator de impedimento, proporcionando melhores previsões de descarga de sedimento de leito, mas ainda foram notadas algumas discrepâncias. Os resultados apresentados revelaram que considerar a forma das partículas em fórmulas através do índice de circularidade aumentou as percentagens das estimativas de transporte de sedimento de leito. Um novo ajuste de Wu et al (J hydraul Res 38: 427-434, 2000) foi proposta uma fórmula e obteve-se um muito bom acordo entre os valores medidos e previstos.</p>
Fairbank et al (2011)	<p><b>Local: Rio Niobrara - Nebraska</b></p> <p><b>Resultados:</b> Neste estudo obtém-se a melhora nos cálculos de carga de sedimentos total , com base em medições de concentração de sedimentos integrador de profundidade para canais com transporte de sedimentos em suspensão significativa. A expansão em série do método de Einstein modificado (SEMEP) remove a maioria do empirismo encontradas nos procedimentos do método de Einstein modificados existentes (MEP). Para o</p>

Quadro 2 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos de Cálculos de carga de sedimento a partir de medições pontuais realizados no mundo (continuação)

Autor	Resultados
Fairbank et al. (2015).	<p>SEMEP os cálculos requerem medições de campo de descarga de fluxo, sedimento em suspensão (SS) concentração integrado de profundidade e tamanhos de partículas em suspensão. SEMEP calcula o número Rouse, <math>R_o</math>, a partir do tamanho de partícula médio medido em <math>D_{50}</math>, sedimentos em suspensão. Com base nas medições de descarga de sedimentos recolhidos a partir de 14 rios, a precisão dos cálculos de descarga de sedimentos dependem da razão entre a velocidade de cisalhamento (<math>u^*</math>) e a velocidade de sedimentação (<math>\omega</math>). SEMEP executa com precisão (Erro inferior a 25%) quando <math>u^*/\omega &gt; 5</math>. Os cálculos também são aceitáveis, mas menos precisos quando <math>u^* = \omega</math> é entre dois e cinco. Tanto SEMEP e MEP não devem ser utilizados quando o valor de <math>u^* / \omega &lt; 2</math>, e uma fórmula simplificada baseada na descarga do sedimento de fundo, é recomendada quando <math>u^* / \Omega &lt; 2</math>.</p> <p><b>Local:</b> Dados de laboratório Coleman, e de campo medições do Enoree, Médio Rio Grande e Rio Mississippi.</p> <p><b>Resultados:</b> O estudo utilizou para calcular a descarga total de sedimentos em rios de leito arenoso a velocidade e as medições da concentração de sedimentos em suspensão. Os cálculos com a expansão em série do método do Einstein modificado (SEMEPP) que depende do diâmetro de grãos (<math>d_s</math>) e velocidade sedimentação (<math>\omega</math>), profundidade de fluxo (<math>h</math>), velocidade de cisalhamento (<math>u^*</math>) e profundidade de amostragem (<math>h_p</math>). Este procedimento amplia a aplicabilidade do método de Einstein Modificado (MEP) utilizando medições de concentração de sedimentos e velocidade. Este procedimento é testado usando os dados de laboratório a partir de Coleman e medições de campo do Enoree no Médio Rio Grande e os rios Mississippi. Com base em 801 medições, em mais de 124 verticais em profundidades de escoamento que variam de 0,17 m para 33,5 m e concentrações de sedimentos menores que <math>0,1 \text{ kg L}^{-1}</math>, a exatidão dos cálculos depende <math>u^*/w</math> e <math>h_p/d_s</math>. As técnicas de medição como SEMEPP são bem adequadas quando <math>u^*/\omega &gt; 5</math>, onde pelo menos 60% da carga total de sedimentos é medido e quando 90% da profundidade do escoamento é amostrado. A determinação da descarga de sedimentos a partir de medições pontuais é mais precisa em rios profundos quando <math>h_p/d_s &gt; 10.000</math> e U medições <math>u^*/\omega &gt; 10</math>. As medições pontuais não são bem adaptados para rios rasos e calhas de laboratório, onde <math>h &lt; 0,5 \text{ m}</math> e quando <math>u^*/\omega &lt; 2</math>.</p> <p>Local: rio Lancang-Mekong – China</p>
Liu et al (2013)	<p><b>Resultados:</b> As mudanças na carga de sedimentos anual em 7 estações no rio foram analisados.. A carga de sedimentos aumentou em Gajiu, Yunjinghong e Chiang Saen ao longo do período 1985-1992 por causa de grave erosão do solo causada pela expansão de cultivo, a substituição de florestas naturais por plantações e perturbação do solo associada a construção de hidroelétrica A redução acentuada da carga de sedimentos ocorreu em Gajiu após o represamento da barragem Manwan Hydropower no rio Lancang, mas esta redução não foi evidente a jusante para Yunjinghong e as estações mais a jusante. Aumento significativo na carga de sedimentos apareceu em Mukdahan e Khong Chiam. Esses padrões contrastantes de mudança refletiram na influência das contribuições de sedimentos das bacias hidrográficas intervenientes e sistemas de canais, bem como armazenamento e remobilização de sedimentos a partir do sistema de canais e o impacto de obras hidráulicas, tais como sistemas de irrigação. Em longo prazo a carga de sedimentos anual do rio Mekong é estimada em cerca de <math>145 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}</math>, que é menor do que valores relatados.</p>

Quadro 2 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos de Cálculos de carga de sedimento a partir de medições pontuais realizados no mundo (continuação)

Autor	Resultados
Tarazón et al. (2014)	<p><b>Local:</b> Rio Isábena, Pireneus centrais, Espanha. O monitoramento realizou-se de 2011 a 2012 .</p> <p><b>Resultados</b> A partir das descargas dominantes e dinâmica de sedimentos os cálculos de sedimento em suspensão que são baseados em registros contínuos de descarga e turbidez. Obtiveram-se descargas dominantes para a descarga de sedimentos (ou seja, desempenho eficaz) apresentam uma distribuição bimodal, um pico que cai no intervalo de baixos fluxos e a outro associado a menor frequência porém mais com inundações elevadas de maior magnitude. A alta disponibilidade de sedimento em suspensão , junto com a alta conectividade entre o áreas sensíveis a erosão, do fluxo de corrente e do armazenamento do canal de sedimentos finos, faz com que grandes e pequenos eventos remobilizem os sedimentos finos. O escoamento de base, apesar de sua baixa capacidade de ressuspensão e de gerar enormes cargas de sedimento. Assim, o eficaz desempenho (isto é, a descarga que transporta a maior parte do sedimento) não está unicamente associado com descarga de fundo (Isto é, a descarga que domina forma de canal), mas a uma mais ampla gama de descargas. Consequentemente, este canal do rio não é especificamente ajustado para transmitir a maior parte da carga de sedimentos durante a alta inundações, como em muitos outros rios, mas em contraponto grandes volumes de sedimentos são transferidos para jusante a uma taxa quase constante. Os resultados sugerem que a descarga dominante pode desempenhar um papel menor em termos de carga de sedimentos suspensos não limitam o abastecimento nos sistemas fluviais e / ou em rios que permanentemente trabalham perto ou da capacidade de transporte completa, como é o caso do Isábena.</p>
Tsai et al. (2010)	<p><b>Local:</b> Dados laboratoriais e de 5 rios dos EUA- China</p> <p><b>Resultados</b> O trabalho propõe um método para estabelecer um perfil de velocidade e um perfil de concentração de sedimento em suspensão com base nos dados medidos constituídos pela velocidade média e concentração média de sedimentos em suspensão no rio e no canal de irrigação. Além, de obter um modelo numérico para computar a carga de sedimento suspenso e de leito, também foi desenvolvido para calcular a taxa de transporte da carga leito quando a carga mensurável está disponível. Com isso, utilizou-se dados publicados obtidos em laboratório e de dados obtidos em campo das cargas de leito, estes foram utilizados no presente estudo para desenvolver um modelo numérico baseado em quatro espessuras diferentes de camada de leito. As descargas de leito calculadas pelo modelo foram encontradas para estar em razoável concordância com os valores de carga de leito de Einstein em função quando a espessura da camada de leito foi tomada em <math>10\theta d</math> ou <math>0.05D</math>. O modelo numérico desenvolvido neste estudo pode ser utilizado para avaliar a validade de outras fórmulas de descarga de leito.</p>
Valentin et al.(2015)	<p><b>Local:</b> Alto da Bacia do Rio Yangtze, na China e no rio Volga Bacia na Europa Oriental.</p> <p><b>Resultados</b> Este artigo sintetizou os principais processos de erosão em terrenos e seu papel na determinação da produção de sedimentos em suspensão (SSY) ribeirinha em dois ambientes geográficos típicos do Alto da Bacia do Rio Yangtze, na China e no rio Volga Bacia na Europa Oriental. Os processos naturais de erosão são os principais responsáveis pela alta SSY na bacia superior do Rio Yangtze e a situação oposta é observada na bacia do rio Volga, onde uma elevada proporção de terras cultivadas na</p>

Quadro 2 - Relação dos resultados obtidos por alguns autores em estudos de Cálculos de carga de sedimento a partir de medições pontuais realizados no mundo (conclusão)

Autor	Resultados
Yang et al. (2003)	<p>metade sul da bacia e leva a intensiva formação de córrego e voçorocas em particular no âmbito dos planaltos. A intensidade de erosão da bacia é comparável com o observado na bacia superior do Rio Yangtze, que é recentemente conhecido como a área com uma das mais elevadas taxas de erosão.</p> <p><b>Local:</b> Dados obtidos da estação experimental do US Waterway (1936), estudo realizado na Universidade Nacional de Singapura</p> <p><b>Resultados:</b> Obteve-se uma nova equação para a estimativa do transporte da descarga de sedimentos total para escoamento em canais aluviais. As vantagens obtidas por esta fórmula são a sua facilidade de cálculo, a precisão na predição, e a ampla gama de aplicação. A descarga total de sedimentos é computada diretamente e é linearmente relacionada com o novo parâmetro total de transporte de carga. As comparações entre a descarga total computadorizada e de sedimentos medidos indicam que as previsões são boas.</p>

A partir disto, observa-se que em análises das descargas anuais de sedimentos em suspensão (durante uma longa serie de dados) foi possível verificar uma redução da descarga de sedimentos, onde a mais provável causa é a conservação do solo e da água na bacia hidrográfica.

Em relação aos métodos de cálculo, observa-se que foi possível estimar o transporte de sedimentos de fundo e total com exatidão para alguns métodos por meio do índice de dispersão apresentado por Aguirre et al.(2006). O uso de ~~modelos~~ equações para calcular o transporte de sedimentos é uma ferramenta que pode ser utilizada para a estimativa da descarga de leito, descarga em suspensão e total, assim como, pode vir a contribuir com à análise de erosão na bacia e o sedimento transportado a um ponto de monitoramento da seção.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim abrange os municípios de Santa Maria e Restinga Sêca, onde a área de drenagem até a seção transversal de monitoramento é de 915 km<sup>2</sup> e área total da bacia é de 1120 km<sup>2</sup>. A seção transversal de monitoramento, que compreende as estações fluviométrica e sedimentométrica localiza-se na rodovia RST 149 próximo do município de Restinga Sêca/RS.

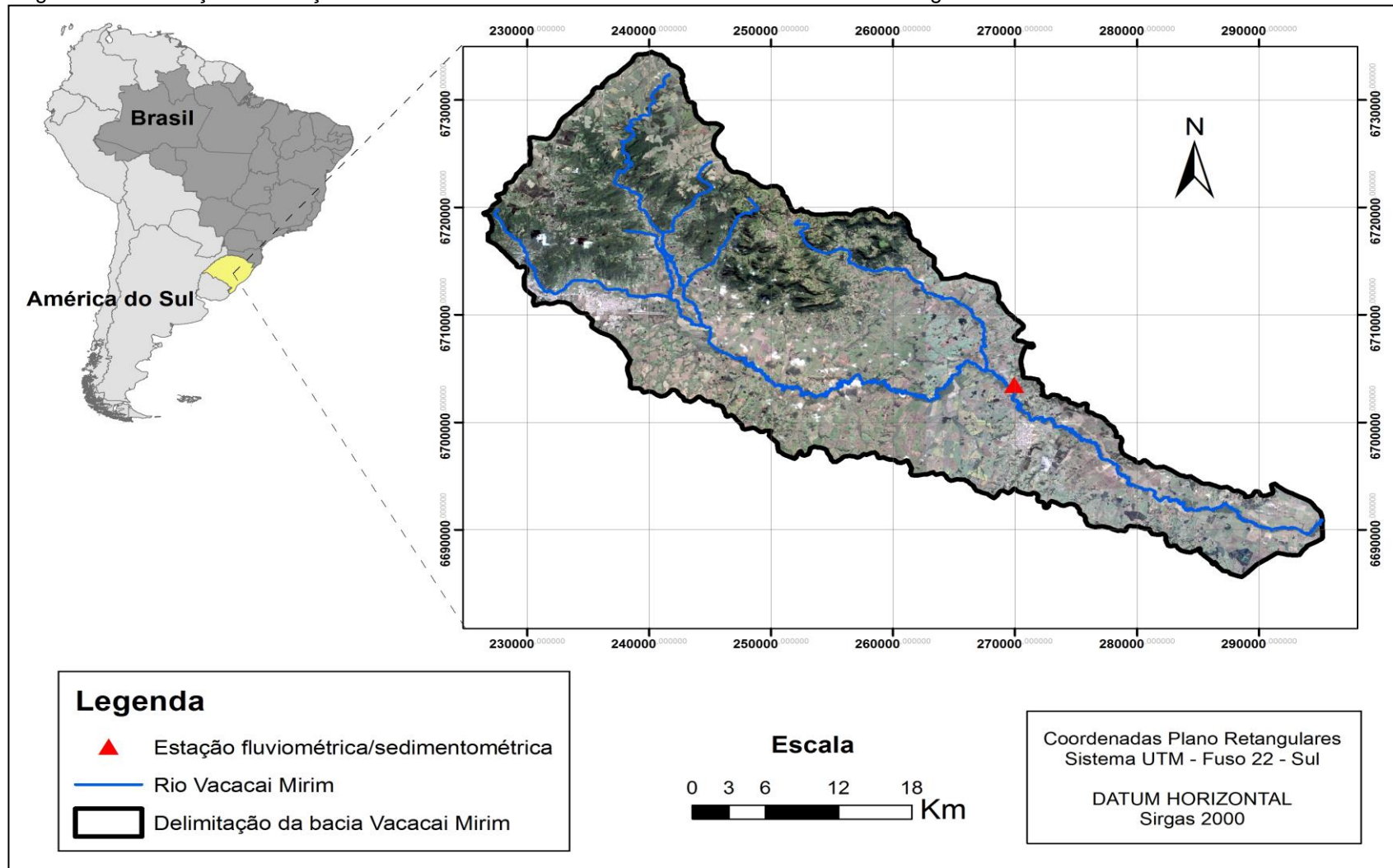
Na tabela 1 são descritas as coordenadas geográficas e os tipos de equipamentos utilizados nas estações fluviométrica e sedimentométricas na área de estudo.

Tabela 1 - Descrição das estações sedimentométrica e fluviométrica utilizadas neste estudo.

Estação	Coordenadas Geográficas		Equipamento
	Latitude	Longitude	
Sedimentométricas	-29°48'03" S	53°22'7" W	Amostradores de material em suspensão, de arraste e de leito
Fluviométrica			Linígrafo Orphimedes e Régua fluviométrica

Na figura 1 ilustra-se a bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, juntamente com as estações de monitoramento fluviométrico e sedimentométrico existentes.

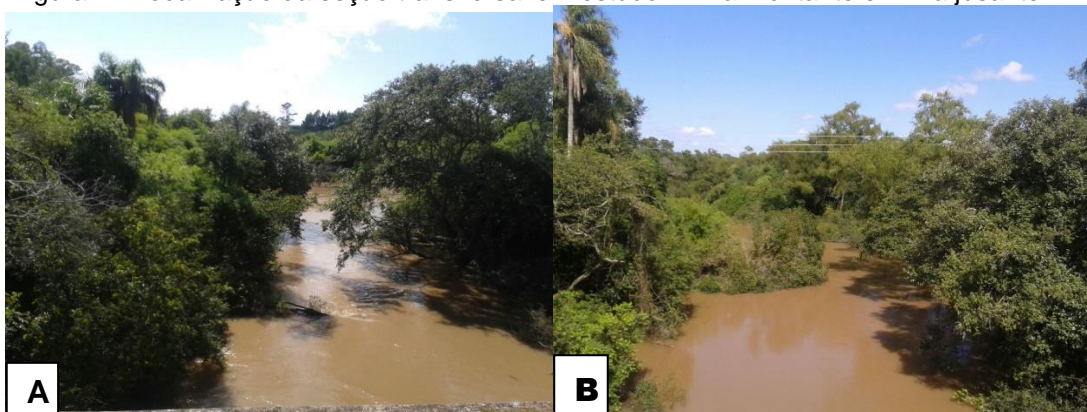
Figura 1 - Localização da estação de monitoramento na bacia do rio Vacacai Mirim em Restinga Sêca





Na figura 2 apresentada uma vista a jusante e a outra de montante da seção transversal do rio Vacacaí Mirim onde foram realizadas as campanhas de monitoramento fluviométrico e sedimentométrico.

Figura 2 - Localização da seção transversal em estudo: A – a montante e B – a jusante



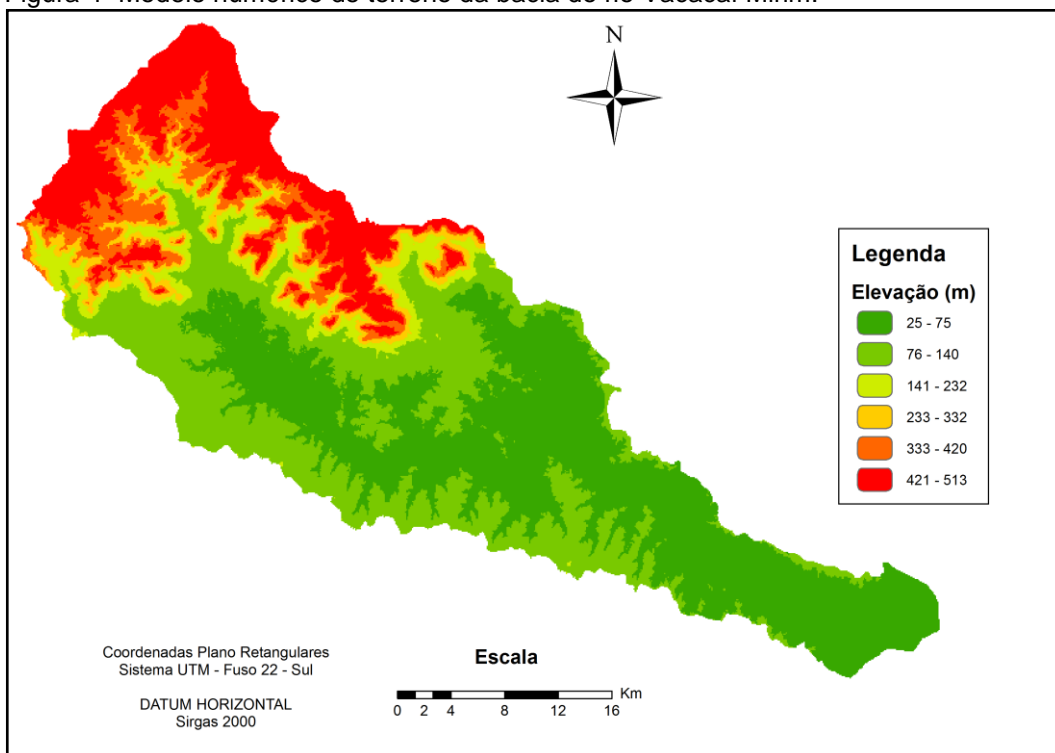
Na figura 3 apresentada a imagem de satélite com a localização espacial da seção transversal de monitoramento fluviométrica e sedimentométrica.

Figura 3 – Imagem de satélite da estação fluviométrica do rio Vacacaí Mirim



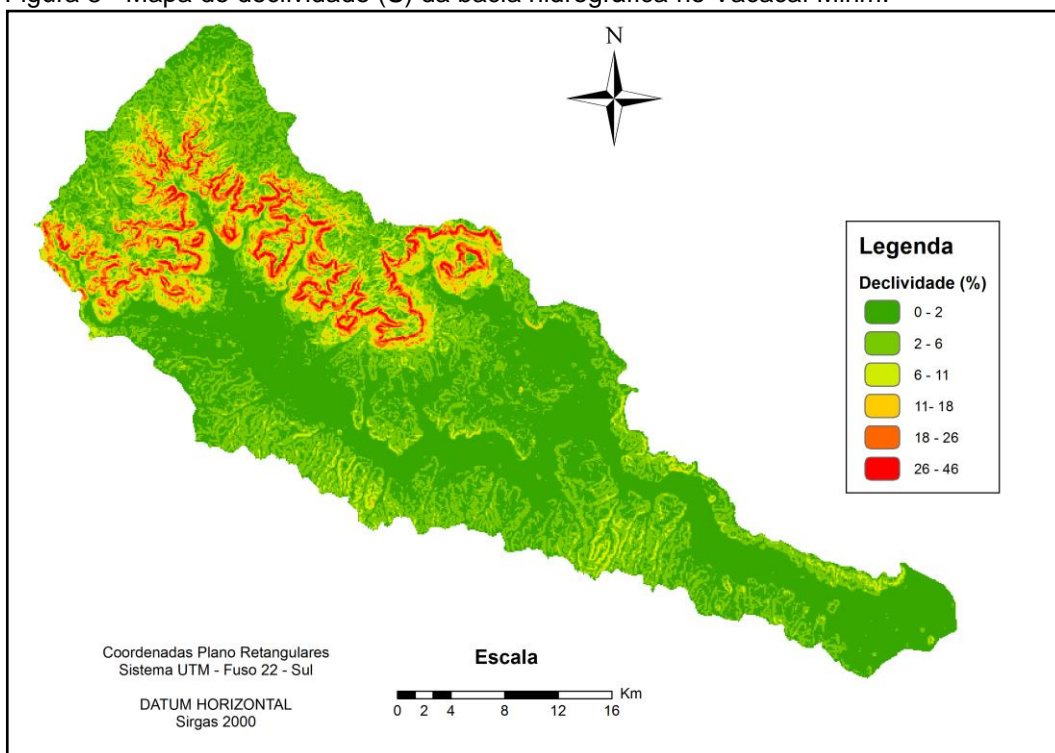
As elevações do terreno da bacia variam desde 37 m até 510 m acima do nível do mar (Figura 4), sendo composto por três relevos característicos: Planalto, rebordo do planalto e depressão central.

Figura 4- Modelo numérico de terreno da bacia do rio Vacacaí Mirim.



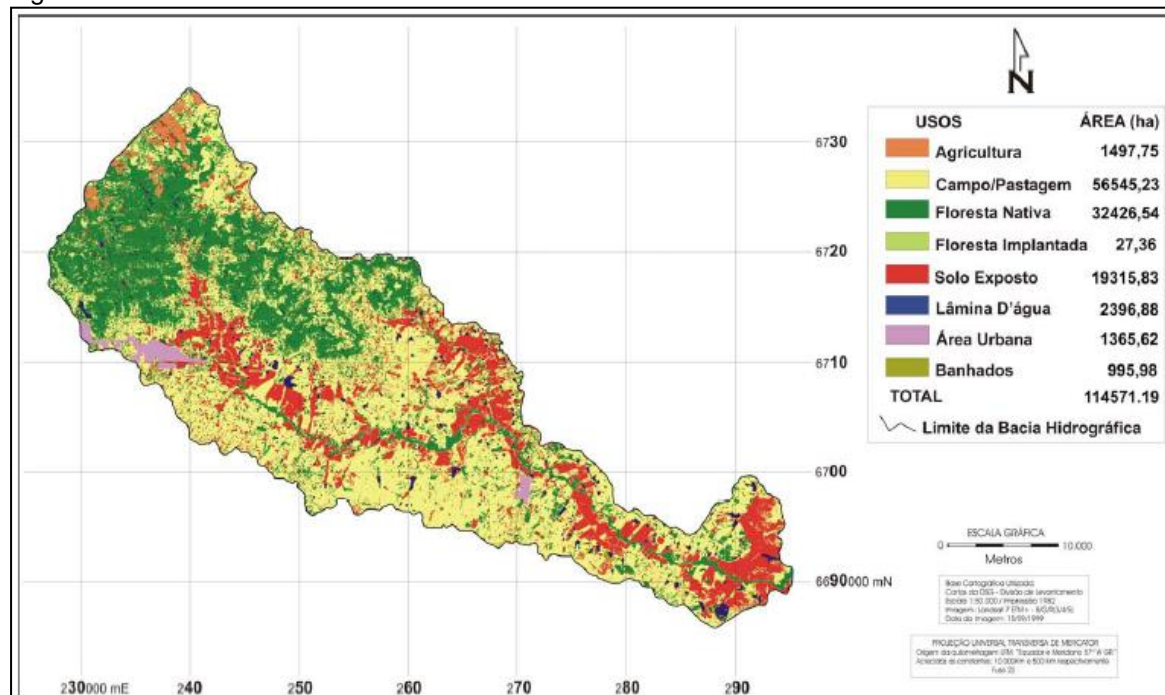
A declividade média da bacia é de 5 % apresentando regiões com declividades que variam de 0% a 3% até valores superiores de 20% (Figura 5).

Figura 5 - Mapa de declividade (S) da bacia hidrográfica rio Vacacaí Mirim.



No ano de 2004 Casagrande (2004) identificou oito usos do solo na bacia do rio Vacacaí Mirim, sendo eles: solo exposto (lavouras de arroz), água (barragens), campo, agricultura, floresta nativa, banhado e área urbana, ilustrados na figura 6.

Figura 6 - Uso do solo da bacia do rio Vacacaí Mirim no ano de 2004.



Fonte: Casagrande (2004)

Na tabela 2 são descritas, resumidamente, as áreas de ocupação de cada uso do solo e suas porcentagens em relação a área total da bacia.

Tabela 2 - Uso do solo na bacia do rio Vacacaí Mirim em 2004

Uso do Solo	Área (Km <sup>2</sup> )	Percentual (%)
Agricultura	14,98	1,31
Campo / pastagem	565,45	49,35
Floresta Nativa	324,27	28,30
Floresta Implantada	0,27	0,02
Solo exposto(áreas de arroz em pousio)*	193,16	16,86
Lâmina D' água	23,97	2,09
Área urbana	13,66	1,19
Banhado	9,96	0,87

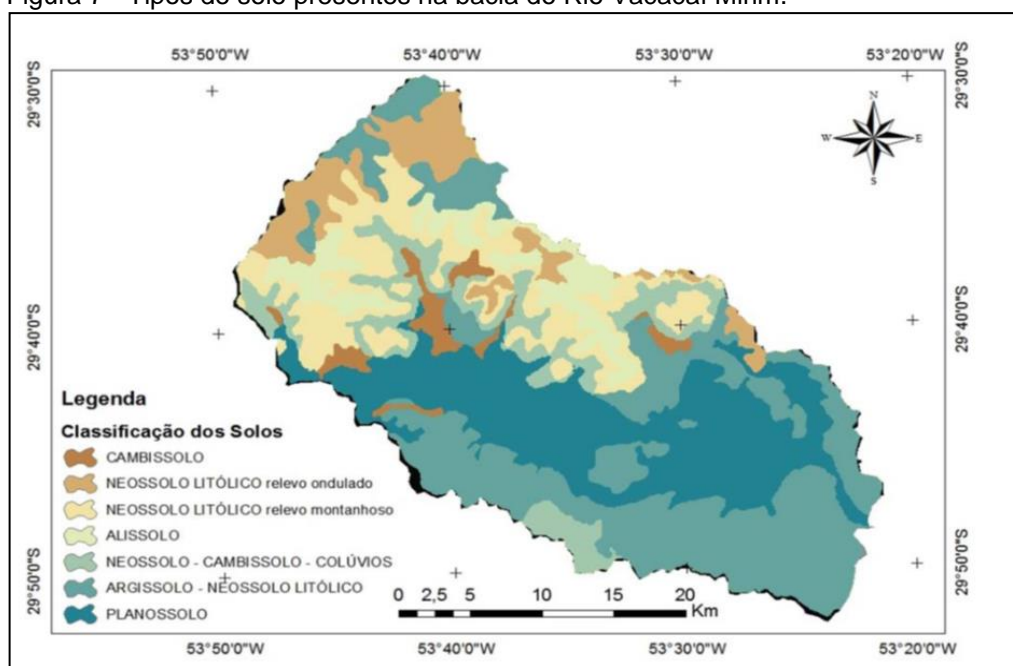
Nota:\* O uso de solo exposto refere-se as áreas de arroz em período de pousio.

Fonte Casagrande (2004)

Observou-se que há predomínio de áreas agropastoris totalizando 67,52% da área da bacia. Os cultivos realizados na bacia incluem o fumo, hortaliças e a cultura do arroz. A área de floresta nativa corresponde a 28,30 % correspondendo a segunda maior área de contribuição quanto ao uso de solo

A figura 7 apresenta os sete tipos de solo presentes na bacia rio Vacacaí Mirim.

Figura 7 - Tipos de solo presentes na bacia do Rio Vacacaí Mirim.



Fonte: Casagrande (2004)

Os tipos de solo predominantes são associações de Argissolo com Neossolo Litólico, com uma área de 338,73 km<sup>2</sup> na porção centro-sul da bacia e a porção composta de Planossolo localizando-se ao sul da bacia, com área de 260,92 Km<sup>2</sup>. Estes solos representam 53% dos solos presentes na bacia.

A classificação climática da região é subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen. É caracterizada pela ocorrência de precipitações bem distribuídas ao longo dos 12 meses do ano, com acumulados anuais variando entre 1700 mm a 1800 mm.

## 4.2 Monitoramento quantitativo

A avaliação quantitativa da água e dos sedimentos foi realizada após eventos de precipitação, levando em consideração o tempo de concentração da bacia (em torno de 46 horas) obtido por meio da equação do Soil Conservation Service (SCS). Foram realizadas 16 campanhas, com período de monitoramento compreendido de outubro de 2014 a dezembro de 2015.

No quadro 3 são apresentados os métodos para amostragem dos sedimentos em suspensão, material de leito e de arraste de fundo, assim como as respectivas metodologias, equipamentos utilizados e ensaios laboratoriais necessários para cada tipo de material.

Quadro 3 - Métodos, equipamentos e ensaios laboratoriais utilizados para caracterização dos sedimentos

<b>Tipo de material</b>	<b>Método de coleta</b>	<b>Equipamento utilizado</b>	<b>Ensaio laboratorial</b>
Sedimento em suspensão	Igual incremento de largura (IIL)  Coleta de cinco amostras na seção  As amostras coletadas nas verticais foram homogeneizadas e condicionada em galão pet de 10 litros	USDH 59 (AMS-1)	Método de evaporação para obter valores médios da concentração de sedimentos em suspensão  Método do tubo de remoção pela base para obter granulometria do material em suspensão.
Sedimento do material do leito	As amostragens em três pontos: 1/4, 1/2 e 3/4 da largura da seção transversal.	US-BMH-60 (Amostrador tipo caçamba)	Método do peneiramento para obter a granulometria do material de leito
Sedimento do material de arraste	Três verticais a 1/6, 1/2 e 5/6 da largura da seção transversal.  O equipamento fica apoiado no leito em torno de 50 minutos, recebendo no receptor de 30 a 50% de sua capacidade.	Helley-Smith	Método do peneiramento para obter a granulometria do material de arraste

Para as medições da descarga líquida foram utilizados molinete hidrométrico Universal e ADP( *Acoustic Doppler Profile*).

### **4.3 Equipamentos e ensaios laboratoriais utilizados para caracterização dos sedimentos segundo Carvalho (2008)**

#### **4.3.1 Equipamentos para amostragem de sedimentos**

##### **4.3.1.1 Medição de sedimentos em suspensão**

As medidas de sedimentos em suspensão objetivaram a determinação da concentração média de sedimentos em suspensão e da distribuição granulométrica dos sedimentos do material em suspensão na seção. Para isso, as amostragens foram realizadas com o auxílio do amostrador USDH 59(AMS-1) (Figura 8), por meio de cinco amostras integradas na profundidade pelo método de amostragem de igual incremento de largura (II-L) conforme descrito por Carvalho (2008). Assim sendo, as amostras coletadas nas verticais foram homogeneizadas e acondicionadas galões pet de 10 litros e encaminhadas ao LASED - UFSM com a finalidade de obter os valores médios da concentração de sedimentos em suspensão como também da granulometria do material em suspensão.

Figura 8- Amostrador USDH 59 (AMS-1)



#### 4.3.1.2 Medição de sedimentos de arraste de fundo e material de leito

As medições de descarga de fundo foram realizadas com o auxílio do amostrador Helley Smith (US-BL-84) (figura 9), em três verticais pré-definidas da seção transversal do rio, localizadas a  $1/6$ ,  $1/2$  e  $5/6$  da largura da seção realizada por Rizzardi (2013) na estação de monitoramento do rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca. Em cada um destes pontos, o amostrador permaneceu apoiado no leito do rio por cinquenta minutos, após esse período, o aparelho foi retirado e a amostra devidamente etiquetada e transportada para o laboratório a fim de se determinar a descarga sólida de arrasto na seção transversal do rio.

As coletas de amostras para a caracterização do material de leito foram realizadas com o amostrador de caçamba de escavação US-BMH-60 (figura 10). As amostragens se realizaram em três pontos, localizados a  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  da largura da seção transversal, conforme realizado por Rizzardi (2013) e posteriormente as amostras serão homogeneizadas para a caracterização granulométrica do sedimento.

Figura 9 - Amostrador Helley Smith (US-BL-84)



Figura 10- Amostrador de caçamba de escavação US-BMH-60



#### 4.3.2 Ensaios Laboratoriais utilizados para caracterização dos sedimentos

As análises de laboratório compreenderam a determinação da concentração de sedimentos em suspensão, determinação das distribuições granulométricas do material em suspensão, do leito e do material transportado por arraste de fundo.

Todas as análises realizadas no Laboratório de Sedimentos (Lased) seguiram as metodologias apresentadas pela CESP (2008). A concentração de sedimentos em suspensão foi determinada pelo método de evaporação, a análise da granulométrica do material em suspensão foi realizada pelo método do tubo de retirada pelo fundo. Já para a análise da granulometria dos materiais coletados por arraste de fundo e do material de leito, foram realizados ensaios de peneiramento.

##### 4.3.2.1 Método de Evaporação

A fim de obter-se a concentração total do material em suspensão, o ensaio de evaporação é indicado para rios de baixa concentração (menor que 200 mg/L). O procedimento iniciou-se com a amostra recolhida a campo, sendo



colocada em repouso por 24 horas em um recipiente de 1000 ml. Após a decantação, foram retiradas duas porções de 50 ml cada, do material sobrenadante para correção dos sólidos dissolvidos (isenta de sedimentos) com auxílio de uma pipeta volumétrica, transferindo esse volume para dois béqueres de 50 ml com peso conhecido. Por seguinte, os béqueres foram levados à estufa por 24 horas, que após a evaporação total da amostra, os recipientes foram levados ao dessecador e em seguida pesados.

Após essa primeira etapa, a mesma amostra utilizada anteriormente foi reduzida a porção decantada com auxílio de uma mangueira ao volume menor de 100 ml. Assim, o material remanescente foi transferido a uma proveta graduada anotando-se o volume transferido. Com o volume conhecido, transferiu-se a um béquer de 250 ml e levou-se a estufa (24 horas). Após esse período, o béquer foi levado ao dessecador e posteriormente pesado.

Com a divisão do volume coletado pelo peso seco obtido, foi encontrada a concentração total para as amostras coletadas.

#### 4.3.2.2 Tubo de remoção pela base

O tubo de remoção pela base é indicado para a determinação da granulometria e da concentração do material contido da amostra. Para esta pesquisa, o método foi utilizado apenas para a determinação da granulometria do material em suspensão.

Devido à baixa quantidade de material sólido em suspensão, foram coletadas em todas as campanhas cerca de 20 litros integrados na vertical a fim de satisfazer a quantidade do material (0,15 a 5 gramas) para a realização do ensaio. Ou seja, os vinte litros da amostra em suspensão foram quarteados até chegar ao volume de cerca de 0,5 litros e assim realizar o ensaio.

Após esse procedimento, a amostra foi inserida em um tubo de vidro graduado de 1000 centímetros e agitado durante cinco minutos a fim de obter uma boa homogeneização do material. As amostras foram retiradas de dez em dez graduações em intervalos de tempo determinados de acordo com o diâmetro de precipitação das partículas. Os tempos para retirada de cada amostra eram

de: 30"; 1'; 2'; 5'; 13'; 32'; 1:20'; 2:40'; 7:30' e 7:31' após o início do ensaio, após a última leitura, o tubo de vidro foi lavado com água destilada para retirar os sedimentos restantes. Para cada amostra retirada na graduação de 10 cm, foi medida a temperatura da água. As amostras retiradas foram levadas para a secagem em estufa a 105°C durante 24h. O peso total da amostra foi obtido pela diferença entre o peso seco e a tara do béquer.

#### 4.3.2.3 Ensaio de peneiramento

Para a determinação dos diâmetros característicos e realizar a curva da distribuição granulométrica do material de arraste e do leito, todas as amostras recolhidas nas verticais mencionadas para cada material, foram devidamente secas em Estufa (105°C) por no mínimo 24 horas. Após esse período, as cápsulas contendo sedimentos foram acondicionadas em um dessecador por pelo menos uma hora até atingir a temperatura ambiente para estabilizar o peso. Posteriormente, determinou-se o peso seco tanto das amostras de fundo como as do leito. Após pesagem, as cápsulas foram levadas para mufla (500°C) para a queima da matéria orgânica e possível eliminação de interferência na estimativa dos diâmetros característicos do material de arraste e do leito. Foi novamente acondicionada no dessecador e realizada uma nova pesagem. Com o peso seco conhecido as amostras serão submetidas à agitação de quinze a vinte minutos. O peneiramento das amostras foi realizado em sete classes de tamanho, utilizando-se o um conjunto de peneiras com os diâmetros de abertura de malha em milímetros de: 4/2/1/0,5/0,25/0,125/0,0625.

A fração de partículas em cada classe foi obtida dividindo-se a massa de partículas secas de uma determinada classe pela massa total de solo seco da amostra peneirada. Os resultados obtidos, em cada experimento, foram utilizados para traçar a curva granulométrica, da qual se obteve os diâmetros característicos ( $D_{90}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{65}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{35}$ ,  $D_{16}$  e  $D_{10}$ ).

#### 4.4 Estimativas indiretas dos sedimentos transportados na seção

A partir das medições a campo foram realizados levantamentos hidráulicos e geométricos na seção transversal. As viscosidades cinemáticas foram obtidas em função da temperatura da água amostrada para cada evento.

A caracterização do coeficiente de Manning para a seção foi realizada com base no procedimento proposto por Cowan (1944) apud Chow (1959) e utilizado por Matos et al. (2011), por meio da equação 1

$$n = (n_0 + n_1 + n_3 + n_4) m_5 \quad (1)$$

Onde  $n_0$  é o valor básico de  $n$  para um canal reto, uniforme e liso, livre de materiais naturais envolvidos;  $n_1$  é o valor adicional a  $n_0$ , para correção dos efeitos das irregularidades da superfície;  $n_2$  é um valor para variações na forma e tamanho do canal através da seção;  $n_3$  é o valor para obstruções;  $n_4$  é o valor para a vegetação e condições de escoamento; e  $m_5$  é um fator de correção das sinuosidades do canal.

Os valores para a obtenção deste coeficiente, fornecidos por Chow (1959), encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3- Valores para a computação do coeficiente de Manning

Condições do Canal		Valores	
Material envolvido	Terra	$n_0$	0,020
	Rocha cortada		0,025
	Cascalho Fino		0,024
	Cascalho Grosso		0,028
Grau de irregularidade	Liso	$n_1$	0,000
	insignificante		0,005
	Moderado		0,010
Variações na seção transversal	Servero	$n_2$	0,020
	Gradual		0,000
	Alterado		0,005
Efeito Relativo das obstruções	Alterado	$n_3$	0,010 - 0,015
	Desprezível		0,000
	insignificante		0,010-0,015
Vegetação	Apreciável	$n_4$	0,020 - 0,030
	Severo		0,040 - 0,060
	Baixa		0,005 -0,010
	Média		0,010 - 0,025
	Alta		0,025 - 0,050
	Muito Alta		0,050 - 0,100

Tabela 4- Valores para a computação do coeficiente de Manning (continuação)

Condições do Canal		Valores	
Grau de Sinuosidade	Insignificante	m <sub>5</sub>	1,000
	Apreciável		1,150
	Severa		1,300

A declividade da linha d' água foi determinada pela equação 2.

$$S = \left( \frac{Q \cdot n}{A \cdot Rh^{2/3}} \right)^2 \quad (2)$$

Onde:

S: declividade da linha d' água (m/m);

Q: vazão (m<sup>3</sup>/s);

n: coeficiente de Manning (m<sup>-1/3</sup> s);

A: área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

Rh: raio hidráulico da seção (m).

#### 4.4.1 Métodos indiretos de cálculo da descarga sólida de arrasto e de material de leito.

No quadro 4 são mostrados os métodos de cálculo utilizados para a estimativa indireta das descargas sólidas transportadas no rio Vacacaí Mirim. Destaca-se que, para efeitos de comparação dos resultados, ou seja, para a avaliação da variação temporal dos sedimentos transportados na seção foram comparados os resultados obtidos neste estudo para os métodos de cálculo com resultados obtidos em estudos anteriores.

Quadro 4 - Métodos indiretos para a determinação da descarga sólida

Tipo de descarga sólida	Métodos utilizados
Descarga sólida de arrasto	Meyer-Peter e Muller (1948), Karim (1998), Cheng (2002)
Descarga sólida total (sem dados medidos)	Laursen (1958), Engelund e Hansen (1967), Toffaleti (1969), Yang (1973), Ackers e White (1973)
Descarga sólida total (com dados medidos)	Método de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955), Van Rijn (1984), e Método simplificado de Colby(1957)

4.4.2 Descrição dos métodos indiretos de cálculo da descarga sólida, de acordo com Paiva (1988), Scapin (2005) e Rizzardi (2013)

4.4.2.1 Métodos de cálculo da descarga em suspensão

4.4.2.1.1 Método de Ackers e White (1973)

Ackers e White (1973) afirmam que há oito variáveis necessárias para o cálculo da descarga sólida do material do leito, dentre elas: Vazão ( $m^3/s$ ); diâmetro da partícula ( $D_{35}$  em m); peso específico do sedimento ( $\gamma_s$  em  $t/m^3$ ); aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ); velocidade média do escoamento ( $U$  em  $m/s$ ); profundidade do escoamento ( $d$  em m) e viscosidade cinemática da água ( $\nu$  em  $m^2/s$ ).

O equacionamento do método de Ackers e White é descrito por Paiva (1988) e Ackers e White (1973), como mostra as equações 5 A 19. .

Primeiramente, calcula-se a velocidade de atrito conforme a equação 3.

$$u^* = \sqrt{9,81 \cdot d \cdot S} \quad (3)$$

Onde:

$d$ : é a profundidade média (m);

$S$ : a declividade da linha da água (m/m)

Após, calcula-se o tamanho característico do grão, que pode ser aplicável a diversos tamanhos de sedimentos (grosseiros, médios ou finos), por meio da equação 4:

$$D_{gr} = D_{35} \left[ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

Ackers e White (1973) propuseram uma análise dimensional para expressar a mobilidade do sedimento ( $f_{gr}$ ), que é a razão entre a força de atrito apropriada e o peso submerso de uma camada de grãos por unidade do leito.

esta razão pode-se ser obtida a grandeza adimensional de mobilidade para o transporte de sedimentos, de acordo com a equação 5.

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{\sqrt{gD_{35}(s-1)}} \left[ \frac{U}{\sqrt{32} \log \left( \frac{\alpha \cdot d}{D_{35}} \right)} \right]^{1-n} \quad (5)$$

A função geral para o transporte de sedimentos pode ser expressa a partir da equação 6 e 7 :

$$G_{gr} = f(F_{gr}, d_{gr}) \quad (6)$$

Com:

$$G_{gr} = \frac{X \cdot D}{d\gamma/\bar{\alpha}} \cdot \left( \frac{U_*}{V} \right)^n \quad (7)$$

Onde:

X: representa o fluxo de massa de sedimentos por vazão líquida em massa.

Assim sendo, a descarga sólida adimensional pode ser determinada pela equação 8

$$G_{gr} = CA \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (8)$$

Onde:

$\alpha$  é um coeficiente, que em regime turbulento é igual a 10;

n o expoente de transição que depende da granulometria do sedimento;

A o número de Froude em movimento inicial;

m expoente da função de transporte de sedimento;

CA coeficiente da função de transporte de sedimento.

Ackers e White(1973) determinaram também os valores de  $n$ ,  $A$ ,  $m$  e  $CA$  baseado em curvas de melhor ajuste dos dados de laboratório com o tamanho dos sedimentos maiores que 0,04 mm e números de Froude menores que 0,8 para os seguintes intervalos granulométricos:

$D_{gr} > 60$  (sedimentos grosseiros):

$$n = 0; A = 0,17; m = 1,5; CA = 0,025 \quad (9)$$

Número de pontos amostrados para  $1 \leq D_{gr} \leq 60$  (transição) conforme equação 10

$$n = 1 - 0,56 \log D_{gr} \quad (10)$$

Área da seção transversal ao escoamento e valor do número de Froude em movimento inicial, conforme equação 11.

$$A = 0,23 D_{gr}^{-1/2 + 0,14} \quad (11)$$

Expoente da função de transporte de sedimento, de acordo com equação 12

$$m = (9,66/D_{gr}) + 1,34 \quad (12)$$

Coefficiente da função de transporte de sedimento, conforme equação 13

$$\log CA = -3,53 + 2,86 \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 \quad (13)$$

$D_{gr} < 1$  (sedimentos finos): o método não se aplica.

A equação original de Ackers e White (1973) é conhecida por superestimar o transporte de sedimentos finos (menores que 0,22 mm) e de sedimentos grosseiros. Para corrigir essa tendência, Wallingford (1990) revisa alguns coeficientes desta equação a fim de minimizar esses erros.

A seguir são mostradas as revisões de alguns coeficientes que foram alterados em relação aos coeficientes originais de Ackers e White (1973).

Coeficiente da função de transporte de sedimento revisados por Wallingford (1990) para:  $1 \leq D_{gr} \leq 60$ , conforme equação 14

$$\log CA = -3,46 + 2,79 \log D_{gr} - 0,98 (\log D_{gr})^2 \quad (14)$$

Expoente da função de transporte de sedimento revisados por Wallingford (1990) para intervalo granulométrico de transição, conforme equação 15.

$$m = (6,83/D_{gr}) + 1,67 \quad (15)$$

Casos em que  $D_{gr} > 60$ , apenas o expoente da função de transporte de sedimento é alterado, para  $m = 1,78$ .

Para materiais finos ( $D_{gr} < 1$ ) os quais apresentam propriedades coesivas, não se aplica as equações de transporte. Ackers e White (1973) afirmam que as equações não são sensíveis às formas de fundo, podendo ser aplicadas a fundos planos, com rugas e com dunas.

Calcula-se então, a concentração da descarga sólida expressa como fluxo de sedimentos por unidade de peso de, pela equação 16:

$$C = 10^6 = \left[ \frac{G_{gr} \gamma_s D_{50} \left( \frac{V_m}{U_*} \right)}{d_h} \right] \quad (16)$$

Onde:

$\gamma_s$  é o peso específico do sedimento ( $\text{ton}/\text{m}^3$ );

$V_m$  é a velocidade média (m/s) e  $d_h$  a profundidade hidráulica (m).

A descarga sólida total em ton/dia é apresentada pela equação 17:

$$Q_t = 0,0864 \cdot Q \cdot C \quad (17)$$



Onde:

$Q_t$ : Vazão total;

$Q$  é a vazão em  $m^3/s$ ;

$C$  a concentração de sedimentos do material de leito (ppm).

#### 4.4.2.1.2 Método de Yang (1973)

A partir de um grande número de experimentos, Yang (1973) relacionou a taxa de transporte de sedimento com a taxa de dissipação de energia do fluido (potência unitária da corrente) usada no transporte de sedimento.

Os dados de entrada necessários para a aplicação do método de Yang (1973) são:  $D$  que representa o diâmetro médio do sedimento (m),  $U$  a velocidade média do escoamento (m/s),  $Q$  a vazão ( $m^3/s$ ),  $B$  a largura da superfície da água (m);  $\nu$  a viscosidade cinemática da água ( $m^2/s$ ),  $d_h$  a profundidade hidráulica (m),  $R_h$  o raio hidráulico (m) e  $S$  a declividade da linha d'água (m/m).

A velocidade de atrito relativa aos grãos é obtida pela equação 18..

$$u^* = \sqrt{9,81 \cdot R_h \cdot S} \quad (18)$$

Onde:

$R_h$  é o raio hidráulico (m);

$S$  a declividade da linha d'água (m/m).

Calcula-se a velocidade de queda da partícula de sedimento em suspensão ( $W$ ) pelas equações 19 e 20:

Para partículas maiores ou iguais a 0,1 mm, usa-se a equação de Rubey (1933), equação 19:

$$W = \frac{\left[ \frac{2}{3} g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) D_i^3 + 36 \nu^2 \right]^{0,5} - 6\nu}{D_i} \quad (19)$$

Para partículas menores do que 0,1 mm usa-se a equação de STOKES, equação 20:

$$W = \frac{1}{18} \frac{(s-1)gD_s^2}{\nu} \quad (20)$$

Onde:

$\gamma_s$  é o peso específico do sedimento (Kgf/m<sup>3</sup>);

$\gamma$  o peso específico da água (Kgf/m<sup>3</sup>);

$g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$D_i$  o diâmetro médio do grão (m);

$D_s$  o diâmetro médio das partículas em suspensão (m) e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/s).

Calcula-se então a relação entre a velocidade crítica adimensional do escoamento no movimento incipiente e a velocidade de queda:

Para a relação  $1,2 \leq U_c D / \nu < 70$ , conforme equação 21:

$$\frac{U_c}{W} = \frac{2,5}{\log\left(\frac{U_c D}{\nu}\right) - 0,06} + 0,66 \quad (21)$$

Para a relação  $70 < U_c D / \nu$  conforme equação 22:

$$\frac{U_c}{W} = 2,05 \quad (22)$$

Segundo Yang et al. (1996) a concentração total de material de leito no escoamento para grãos de diâmetro de até 2 mm é estimado pela equação 23, e para diâmetros superiores a 2 mm pela equação 24:

$$\begin{aligned} \log CT &= 5,43 - 0,286 \log\left(\frac{W \cdot D}{\nu}\right) - 0,457 \log\left(\frac{U_*}{W}\right) \\ &+ (1,799 - 0,409 \log\left(\frac{W \cdot D}{\nu}\right) - 0,314 \log\left(\frac{U_*}{W}\right)) \log\left(\frac{U \cdot S}{w} - \frac{U_c S}{w}\right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \log CT &= 6,681 - 0,633 \log\left(\frac{W \cdot D}{\nu}\right) - 4,816 \log\left(\frac{U_*}{W}\right) \\ &+ (2,784 - 0,305 \log\left(\frac{W \cdot D}{\nu}\right) - 0,282 \log\left(\frac{U_*}{W}\right)) \log\left(\frac{U \cdot S}{w} - \frac{U_c S}{w}\right) \end{aligned} \quad (24)$$

Onde:

CT é a concentração total de sedimento por peso;

U a velocidade média do escoamento (m/s);

U\* a velocidade de atrito (m/s);

W é a velocidade de queda do grão (m/s);

U<sub>c</sub> a velocidade crítica do escoamento no movimento incipiente.

Após obter a concentração em ppm, calcula-se então a descarga sólida em toneladas por dia pela equação 25:

$$Q_t = 0,0864 \cdot Q \cdot CT \quad (25)$$

#### 4.4.2.1.3 Método de Laursen (1958)

Laursen (1958) desenvolveu uma equação para o cálculo da descarga total de sedimentos, na qual relaciona a condição de escoamento e a descarga de sedimentos resultante. A formulação de Laursen determina a concentração média dos sedimentos transportados por intervalos granulométricos (equação 26), a partir dos dados: diâmetro médio do grão ( $D_m$ ); profundidade média do rio, em ft (h), velocidade de cisalhamento, em ft/s ( $u^*$ ), velocidade de queda das partículas de sedimento, em ft/s ( $W_i$ ), tensão de cisalhamento do leito, em lb/ft<sup>2</sup> ( $\tau$ ), tensão de cisalhamento crítica para a partícula de granulometria  $D_{si}$ , lb/ft<sup>2</sup> ( $\tau_{ci}$ ) fração por peso da granulometria do sedimento; ( $i_b$ )

$$C = 10^4 \sum_{i=1}^n i_b \left[ \frac{D_{si}}{h} \right]^{7/6} \left[ \frac{V^2}{58 \cdot Y_c \cdot D_{si} \cdot (s-1) \cdot g} \left( \frac{D_{50}}{d} \right)^{1/3} - 1 \right] f \left( \frac{U_*}{W_i} \right) \quad (26)$$

Onde:

C é a concentração média da descarga do material do leito (ppm);

n numero de frações granulométricas do material do leito;

$D_{si}$  diâmetro médio do grão, no intervalo granulométrico considerado, e ft;

V velocidade média, em ft/s;

$W_i$  é a velocidade de queda do grão de diâmetro  $D_{si}$  (ft/s) e

$Y_c$  é o coeficiente que relaciona as forças tangenciais críticas com os diâmetros do sedimento. Adotam-se os seguintes valores:

$$Y_c = 0,04 \text{ para } D_{si}/\delta > 1 \quad (27)$$

Equação 27 - Coeficiente de relação entre as forças tangenciais críticas para  $D_{si}/\delta > 1$

$$Y_c = 0,08 \text{ para } 0,1 > D_{si}/\delta > 0,03 \quad (28)$$

$$Y_c = 0,16 \text{ para } 0,03 > D_{si}/\delta \quad (29)$$

$\delta$  é a espessura de a camada laminar (em ft), defendida pela Equação 30 :

$$\delta = 11,6 \left[ \frac{v}{U_*} \right] \quad (30)$$

A descarga sólida total por unidade de largura ( $q$ ), em lb/s por ft de largura é dada pela expressão 31:

$$q = 0,0027 \sum_{i=1}^n C_i \cdot h \cdot U \quad (31)$$

Onde:

$C_i$  representa o somatório da concentração dos intervalos granulométricos, calculado pela expressão acima descrita.

Segundo Stevens & Yang (1989), a formula de Laursen é indicada para rios rasos com areia fina ou silte mais grosso.

#### 4.4.2.1.4 Método de Engelund & Hansen (1967)

A equação de Engelund e Hansen (1967) utiliza o conceito de potência da corrente e o princípio da similaridade. Segundo os autores, o procedimento é usado para materiais de leito que tenham diâmetro médio maior do que 0,15

mm. É uma formula que calcula o transporte total dos sedimentos de leito, incluindo o movimento por arrasto e em suspensão (Vanoni, 1977; Stevens & Yang, 1989).

Para sua aplicação o método requer o conhecimento dos seguintes dados:

$\gamma_s$  e  $\gamma$ , peso específico do sedimento e água, respectivamente, em lb/ft<sup>3</sup>;

V velocidade média do escoamento, em ft/s;

$D_{50}$  diâmetro da partícula, para qual 50% do material do leito, por peso, são mais finos, em ft;

S declividade da linha de água, em ft por ft;

L largura da superfície do canal, em ft;

$R_h$  raio hidráulico, em ft e

g aceleração da gravidade, em ft/s.

Segundo Carvalho (2008) e Souto (2013) a descarga sólida total de material do leito ( $q_{sl}$ ), em lb/s por ft de largura, é definida pela equação 32.

$$q_{sl} = \frac{0,05 \gamma_s \cdot V^2 \cdot p^{1/2} \cdot S^{3/2}}{D_{50} \cdot g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)^2} \quad (32)$$

#### 4.4.2.1.5 Método de Toffaleti (1969)

Segundo Souto (2013) e Paiva (2007) o método de Toffaleti (1969) possibilita o cálculo separado da descarga sólida de arraste e em suspensão, tendo como base a concepção do método de Einstein e de Chien. As formulações de Toffaleti são válidas para rios com composição granulométrica do material de leito variando de 0,062 a 16 mm (Stevens e Yang, 1989).

Carvalho (2008) e Carvalho *et al.* (2008) descrevem que o método de Toffaleti (1969) da seguinte forma:

A profundidade do curso d'água é dividida em quatro zonas conforme a Figura 8, onde o perfil de velocidade descrito é apresentado pela Equação 33.

$$v = (1 + n_v) \cdot V \cdot \left(\frac{y}{p}\right)^{n_v} \quad (33)$$

Onde:

$v$  velocidade da corrente à distancia  $y$  acima do leito;

$V$  velocidade média do escoamento (ft/s);

$R$  raio hidráulico igual a profundidade  $p$ ;

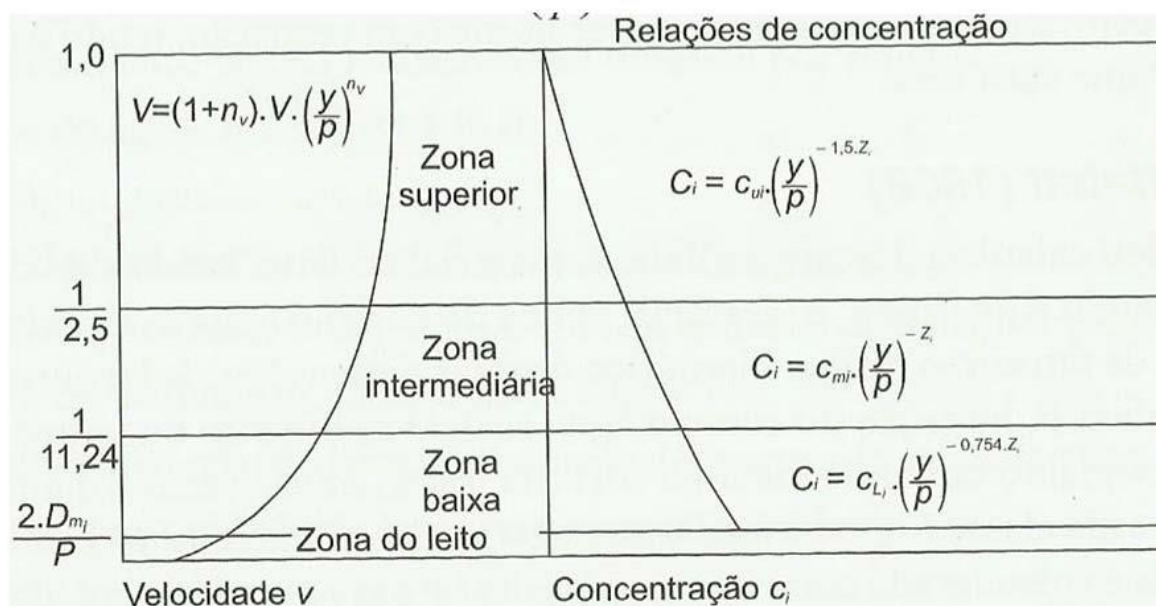
$n_v$  valor calculado empiricamente pela seguinte relação:

Na qual  $T$  é a temperatura da água ( $^{\circ}\text{F}$ ).

$$n_v = 0,1198 + 0,00048 \cdot T \quad (34)$$

A distribuição de concentração (três zonas) acima da zona do leito também é indicada na mesma Figura 11.

Figura 11 - Relação de Toffaleti para cálculo da QST (Simons & Sentururk, 1977)



As equações apresentadas na Figura 8 apresentam valores similares aos da distribuição teórica de concentração, onde o expoente  $Z_i$  é dada pela seguinte expressão 35:

$$Z_i = \frac{W_{si} \cdot V}{C_z \cdot p \cdot S} \quad (35)$$

Sendo:

$w_{si}$  velocidade de queda do sedimento, em ft/s;

$S$  declividade do gradiente de energia da água, em ft/ft e

$C_z=260,67 - 0,667.T$

Para calcular a descarga sólida em suspensão na zona superior, intermediária e inferior,  $q_{sui}$ ,  $q_{smi}$ , e  $q_{sLi}$ , respectivamente, usam-se as expressões obtidas da substituição de  $v$  da Equação 33 na expressão 36:

$$q_{ssi} = \int_a^n C_i \cdot v \cdot dy \quad (36)$$

De acordo com Simons e Senturk (1977) integrando entre os limites apropriados, resulta nas equações 37 a 49:

$$q_{sui} = M_i \frac{\left(\frac{p}{11,24}\right)^{0,244Z_i} \left(\frac{p}{2,5}\right)^{0,5Z_i} \left[p^{n_1} - \left(\frac{p}{2,5}\right)^{n_1}\right]}{n_1} \quad (37)$$

$$q_{smi} = M_i \frac{\left(\frac{p}{11,24}\right)^{0,244Z_i} \left[\left(\frac{p}{2,5}\right)^{n_2} - \left(\frac{p}{11,4}\right)^{n_2}\right]}{n_2} \quad (38)$$

$$q_{sLi} = M_i \frac{\left(\frac{p}{11,24}\right)^{n_3} - (2 \cdot D_{m_i})^{n_3}}{n_3} \quad (39)$$

onde:

$$M_i = 43,2 i_f \cdot C_{Li} (1 + n_v) \cdot V \cdot (p)^{0,756Z_i - n_v} \quad (40)$$

$$n_1 = 1 + n_v - 1,5Z_i \quad (41)$$

$$n_2 = 1 + n_v - Z_i \quad (42)$$

$$n_3 = 1 + n_v - 0,756Z_i \quad (43)$$

O valor de  $q_{sLi}$  pode também ser determinado pela seguinte equação 44:

$$q_{sLi} = \frac{0,600 \cdot i_f}{\left(\frac{T_T A_C K}{V^2}\right)^{5/3} \left(\frac{D_{mi}}{0,00058}\right)^{5/3}} \quad (44)$$

Sendo:

$i_f$  fração do diâmetro médio na classe granulométrica, em ft;

$A_C$  função de  $(105 \nu)^{1/3} / 10 \cdot U^*$  ;

$\nu$  viscosidade cinemática da água,  $ft^2/s$ ;

$U^*$  velocidade de cisalhamento, em  $ft/s$ ;

$T_T$  valor calculado pela expressão:

$$T_T = 1,10 \cdot (0,051 + 0,0009 \cdot T) \quad (45)$$

A velocidade de cisalhamento, que é baseado na tensão de cisalhamento do leito, devido à rugosidade dos grãos de areia, esta em função das expressões 46 E 47.

$$\frac{v^2}{g \cdot \nu \cdot s} e \frac{\nu}{\sqrt{g \cdot D_{65} \cdot s}}$$

O valor de  $k$  tem valor igual a 1,00 para abscissas menores que 0,25 os valores esse que é excedido somente em calhas experimentais. Quando o valor do produto  $A_C \cdot k$  for menor que 16,0, esse valor é adotado para a quantidade do produto.

Se  $D_{mi} \leq 0,00029$ , a equação (44) se reduz a 46:

$$q_{sLi} = \frac{1,095}{\left(\frac{T_T A_C K}{V^2}\right)^{5/3}} \quad (46)$$

A concentração em  $C_{iy}=2 \cdot D_{mi}$  deve ser verificada para garantir que não é falsamente alta, sendo dada pela expressão 47:



$$(C_i)y = 2 \cdot D_{mi} = C_{Li} \left( \frac{2 \cdot D_{mi}}{p} \right)^{-0,756Z_L} \quad (47)$$

Se a concentração dada na equação anterior for maior que 100lb/ft<sup>3</sup>, a C<sub>Li</sub> deverá ser reduzida de tal forma que o valor C<sub>i</sub> seja igual a 100.

Assim sendo, a descarga sólida do leito é calculada pela Equação 48:

$$q_{BI} M_L \cdot (2 \cdot D_{mi})^{n_3} \quad (48)$$

A descarga sólida total do material do leito, em ton/dia, é dada pela expressão 49:

$$Q_{smi} = (q_{sui} + q_{smi} + q_{sLi} + q_{BI}) \cdot L \quad (49)$$

#### 4.4.2.2 Métodos de cálculo para descarga de fundo

##### 4.4.2.2.1 Método de Meyer-Peter e Muller (1948)

A aplicação da proposta de Meyer-Peter e Müller requer o conhecimento dos seguintes parâmetros: peso específico dos sedimentos, os diâmetros característicos do material de fundo, declividade da linha de energia, vazão e a forma da seção transversal do rio.

A equação de Meyer Peter e Müller (1948) (equação 50) é apresentada por simons e senturk (1977).

$$\gamma \left( \frac{K_{st}}{K_r} \right)^{3/2} R \cdot S = 0,047 \cdot \gamma'_s D_m + 0,25 p^{1/3} q_b^{2/3} \quad (50)$$

Sendo: q<sub>b</sub> o peso submerso do sedimento transportado (ton/s.m),

R o raio hidráulico

(m), S o gradiente de energia (m/m),  
 $\gamma$  e  $\gamma'_s$  o peso específico da água e sedimento submerso respectivamente (ton/m<sup>3</sup>),  $\rho$  massa específica da água (UTM/m<sup>3</sup>/1000),  
 $K_{st}$  é o coeficiente de rugosidade de Strickler, que é obtido pela equação 51:

$$K_{st} = \left( \frac{U^2}{SR^{4/3}} \right)^{1/2} \quad (51)$$

Sendo U é a velocidade média do escoamento e  $K_r$  o coeficiente de rugosidade devido à força de cisalhamento, que é obtido pela equação 52:

$$K_r = \frac{26}{D_{90}^{1/6}} \quad (52)$$

Onde:  $D_{90}$  o diâmetro do sedimento maior que 90% do material de fundo e  $D_m$  o diâmetro médio do material de fundo, calculado pela equação 53:

$$D_m = \frac{\sum D_x i_b}{100} \quad (53)$$

Sendo:

$D_m$  o diâmetro médio de uma faixa de diâmetros (m) e  $i_b$  a porcentagem do material do leito, correspondente ao diâmetro.

#### 4.4.2.2.2 Método de Cheng (2002)

Cheng (2002) desenvolveu uma expressão com base nos métodos existentes no que se refere a transporte de sedimentos. O autor estabeleceu uma fórmula exponencial considerando as variações das condições de atrito no leito, derivando assim, uma fórmula para estimar a descarga sólida de arrasto.

Suas expressões baseiam-se em dados experimentais e ajusta o transporte de sedimentos de baixa a elevadas condições de tensões de cisalhamento. O que não acontece com outros métodos de transporte de fundo, como Meyer-Peter e Müller (1948), Bagnold (1973) e Yalin (1977), onde a tensão

de cisalhamento deve ser maior que a tensão de cisalhamento crítica para que ocorra o movimento, ou seja, as condições de tensões de cisalhamento devem ser moderadas ou muito elevadas (CHENG, 2002).

Para aplicação do método de Cheng (2002) são necessárias as seguintes informações:  $d_h$  que é a profundidade hidráulica (m),  $B$  a largura da seção transversal (m),  $S$  a declividade da linha d'água (m/m) e o  $D_{50}$ , que representa o diâmetro da partícula pela qual 50% do material do leito são mais finos (m).

A descarga total de sedimentos por unidade de largura ( $q_b$ ) é obtida pela equação 54:

$$\Phi = \frac{q_b}{D_{50} \sqrt{(ps/p - 1) g D_{50}}} \quad (54)$$

Onde, o parâmetro adimensional da tensão de atrito ( $\theta$ ) e o parâmetro adimensional de transporte ( $\Phi$ ) são dados pelas equações 55 e 56.

$$\theta = \frac{U_*^2}{(ps/p - 1) g D_{50}} \quad (55)$$

$$\Phi = 13. \theta^{1,5} \exp\left(-\frac{0,05}{\theta^{1,5}}\right) \quad (56)$$

Assim sendo, a descarga sólida total ( $Q_{st}$ ) em ton/dia é determinada pela equação 57:

$$Q_{st} = q_b \cdot B \cdot 2,65.86400 \quad (57)$$

#### 4.4.2.2.3 Método de Karim (1998)

Karim (1998) desenvolveu um método para a obtenção da descarga sólida total por unidade de largura. Segundo Paiva (2007) Este método determina uma nova equação para a descarga sólida total para amostras uniformes, considerando-se que a velocidade do escoamento, a velocidade media de

cisalhamento do escoamento, a velocidade de queda das partículas e o diâmetro característico seriam as variáveis de maior significância para a descarga sólida.

A relação de Karim (1998), segundo Molinas *et. al* 2000, Scapin (2005) e Rizzardi (2013) é proposta para escoamento em leito arenoso e é expresso pela equação 58:

$$q_s = 0,00139 \sqrt{g(\gamma_s - 1)D_{50}^3} \left( \frac{U}{\sqrt{g(S_g - 1)D_{50}}} \right)^{2,97} \left( \frac{U_*}{w} \right)^{1,47} \quad (58)$$

Onde:  $\gamma_s$  é o peso específico do sedimento ( $t/m^3$ ),

U a velocidade do escoamento (m/s),

U\* a velocidade media de cisalhamento do escoamento (m/s),

D50 diâmetro dos grãos na qual 50% do material do leito são mais finos (m) e W a velocidade de queda das partículas (m/s) que é definida pela equação 59.

$$w = \left( \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 v^2}{g (\gamma_s - 1) D_{50}^3}} - \sqrt{\frac{36 v^2}{g (\gamma_s - 1) D_{50}^3}} \right) \sqrt{g(\gamma_s - 1) D_{50}^3} \quad (59)$$

Assim sendo, a descarga sólida total ( $Q_T$ ) em ton/dia é obtido pela equação 60:

$$Q_T = q_s \cdot B \cdot 86400 \quad (60)$$

#### 4.4.2.2.4 Método de Van Rijn (1984)

O método de Van Rijn (1984) representou um avanço significativo nas estimativas de descarga sólida devido ao rigor teórico e à qualidade apresentada em suas análises. Além de considerar o transporte sólido total separado em descarga sólida de fundo e descarga em suspensão como o método modificado de Einstein, Van Rijn procurou examinar e definir critérios para identificar o início

do transporte em suspensão, em que, em condições naturais, não há uma divisão exata entre a descarga de fundo e em suspensão (Van Rijn, 1984).

As estimativas da descarga sólida abordam as seguintes grandezas: Velocidade média do escoamento ( $V_m$ ); Profundidade média ( $d$ ); Largura superficial da seção ( $B$ ); Diâmetro característico das partículas ( $D_{50}$ ,  $D_{90}$ ); Massa específica da água e sedimentos ( $\rho$ ,  $\rho_s$ ); Viscosidade cinemática do fluido ( $\nu$ ); Aceleração da gravidade ( $g$ ) e o desvio padrão geométrico da amostra de sedimentos ( $\sigma_s$ ).

As seguintes etapas da aplicação do método de Van Rijn (1984) são descritas por Paiva (2001).

Calcula-se inicialmente o número de Reynolds ( $Rey$ ) pela equação 61:

$$Rey = \frac{4 \cdot R_h \cdot U}{\nu} \quad (61)$$

Onde:

$Rey$  é um parâmetro adimensional dado pela relação entre a força de inércia e a força viscosa,

$U$  representa a velocidade média do escoamento em m/s,

$\nu$  a viscosidade cinemática da água ( $m^2/s$ ) e

$R_h$  o raio hidráulico da seção em m.

Experimentos realizados por Van Rijn demonstraram que valores de  $K_s$  entre  $1D_{90}$  a  $10D_{90}$  com valor médio de  $3D_{90}$ .  $K_s$  é dado pela equação 62:

$$K_s = 3 \cdot D_{90} \quad (62)$$

Após é calculado o fator de atrito ( $f$ ) por tentativas, pela seguinte expressão 63:

$$\frac{1}{f^{0,5}} = -0,86 \cdot \ln \left[ \frac{\left( \frac{K}{4 \cdot R_h} \right)}{3,7} + \frac{2,51}{Rey \cdot f^{0,5}} \right] \quad (63)$$

Determina-se também o fator de atrito relativo às paredes ( $f_w$ ), que é definido como  $f$  em função da relação de  $Rey/f$ , usado nos cálculos de correção das paredes laterais pelo procedimento de Vanoni e Brooks (1957), PELAS relações:

$$\begin{aligned} Rey/f < 5,4 \cdot 10^5 \text{ usa } - \text{ se } f_w &= 0,476 \cdot (Rey/f)^{-0,215} \\ 5,4 \cdot 10^5 < Rey/f < 8 \cdot 10^6 \text{ usa } - \text{ se } f_w &= 0,35 \cdot (Rey/f)^{-0,185} \\ Rey/f > 8 \cdot 10^6 \text{ usa } - \text{ se } f_w &= 0,197 \cdot (Rey/f)^{-0,155} \end{aligned}$$

Calcular o fator de atrito relativo ao fundo ( $f_b$ ), conforme equação 64:

$$f_b = f + \frac{2 \cdot d}{B} \cdot (f - f_w) \quad (64)$$

O raio hidráulico relativo ao fundo ( $R_b$ ), conforme equação 65

$$R_b = \frac{A_b}{P_b} = \frac{f_b \cdot U^2}{8 \cdot g \cdot s} \quad (65)$$

Diâmetro adimensional da partícula  $D^*$  de acordo com a equação 66

$$D^* = D_{50} \left( \frac{(s-1) \cdot g}{v^2} \right)^{1/3} \quad (66)$$

Coefficiente de Chézy relativo aos grãos conforme a equação 67

$$C' = 18 \cdot \log \left( \frac{12 \cdot R_b}{3 \cdot D_{90}} \right) \quad (67)$$

Calcular a velocidade de atrito relativa aos grãos, de acordo com a equação 68.

$$U_* = \left[ \frac{g^{0,5}}{C'} \right] \cdot U \quad (68)$$

O parâmetro de mobilidade crítica ( $\theta_{cr}$ ): início do movimento e suspensão das partículas em m/s, em que:

$$\begin{aligned} D^* \leq 4 \text{ usa} - \text{se } \theta_{Cr} &= 0,24. D^{*-1} \\ 4 < D^* \leq 10 \text{ usa} - \text{se } \theta_{Cr} &= 0,14. D^{*-0,54} \\ 10 < D^* \leq 20 \text{ usa} - \text{se } \theta_{Cr} &= 0,04. D^{*-0,10} \\ 20 < D^* \leq 150 \text{ usa} - \text{se } \theta_{Cr} &= 0,013. D^{*-0,29} \\ D^* > 150 \text{ usa} - \text{se } \theta_{Cr} &= 0,055 \end{aligned}$$

O cálculo da velocidade de atrito crítica ( $\theta_{cr}$ ): valor crítico para o início da suspensão das partículas conforme equação 69.

$$\theta_{Cr} = \frac{(ucr)^2}{(s-1)gD_{50}} \quad (69)$$

Cálculo do parâmetro de transporte que expressa a mobilidade da partícula, em termos de estágio de movimento relativo ao estágio crítico do início do movimento T determinada pela equação 70

$$T = \frac{(u_*)^2 - (u_{*cr})^2}{(u_{*cr})^2} \quad (70)$$

Onde  $u_*$  é a velocidade de cisalhamento relativa ao fundo e  $u_{*cr}$  é a velocidade de cisalhamento crítica de acordo com Shields.

Cálculo da descarga de fundo ( $m^3/s.m$ ) para partículas na faixa de 0,2 a 2,0 mm pela equação 71

$$q_b = \left( 0,053. \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}} \right) \cdot [(s-1) \cdot g]^{0,5} \cdot D_{50}^{1,5} \quad (71)$$

Determinação do nível de referência (a), abaixo do qual, o transporte é considerado de arrasto de fundo:

Se  $K_s \geq 0,01.d$ , então  $a = K_s$ , senão  $a = 0,01.d$

A concentração de referência (Ca), é calculada pela equação 72:

$$Ca = 0,015 \cdot \frac{D_{50}}{a} \cdot \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}} \quad (72)$$

Onde T representa o coeficiente de atrito com o fundo e D\* diâmetro da partícula, ambos adimensionais.

Desvio padrão geométrico do material de fundo, dado pela equação 73

$$\sigma_s = 0,5 \cdot \left[ \frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{16}}{D_{50}} \right] \quad (73)$$

Cálculo do diâmetro das partículas em suspensão (D<sub>s</sub>) (equação 74), que é a partícula representativa do diâmetro em suspensão a qual pode ser menor ou igual ao D50 do diâmetro do material do leito:

$$\frac{D_s}{D_{50}} = 1 + 0,011 \cdot (\sigma_s - 1) \cdot (T - 25) \quad (74)$$

Calcula-se a velocidade de queda do sedimento em suspensão pelas equações:

a) Para partículas com diâmetro menor que 100 μm, usa-se a equação de STOKES (equação 75)

$$W = \frac{1}{18} \cdot \frac{(s - 1) \cdot g \cdot D_s^2}{\nu} \quad (75)$$

b) Para partículas na faixa de 100 a 1000 μm, usa-se a equação de Zanke (1977), equação 76:

$$W = 10 \cdot \frac{\nu}{D_s} \left[ \left( 1 + \frac{0,01(s - 1) \cdot g \cdot D_s^3}{\nu^2} \right)^{0,5} - 1 \right] \quad (76)$$



c) Para partículas maiores que 1000  $\mu\text{m}$ , usa-se a equação proposta por Van Rijn (1982), equação 77.

$$W = 1,1. [(s - 1). D_s]^{0,5} \quad (77)$$

Onde:  $D_s$  expressa o diâmetro representativo das partículas em suspensão.

Velocidade de atrito relativo no fundo pela equação 78.

$$u^* = [g. d. S]^{0,5} \quad (78)$$

Após, procura-se obter o fator  $\beta$  Equação 79, que é definido como um coeficiente relacionado à difusão das partículas de sedimento. Em que  $\beta$  maior do que a unidade indica um domínio da influência das forças centrífugas.  $\beta$  é menor do que a unidade porque as partículas de sedimento não podem responder completamente às flutuações turbulentas da velocidade.

$$\beta = 1 + 2. \left(\frac{W}{u_*}\right)^2 \text{ para } 0,1 < \frac{W}{u_*} < 1 \quad (79)$$

O fator  $\phi$  é definido como um fator de influência das partículas na estrutura do fluido turbulento. Fator de correção representando efeitos adicionais para cada condição hidráulica,  $Ca$ ,  $W$ ,  $u^*$ . O fator  $\phi$  é definido pela equação 80:

$$\Phi = 2,5. \left(\frac{W}{u_*}\right)^{0,8} . \left(\frac{Ca}{Co}\right)^{0,4} \text{ para } 0,01 < \frac{W}{u_*} \leq 1 \quad (80)$$

Calcula-se o parâmetro de suspensão ( $Z$ ) (equação 81) que expressa à influência das forças ascendentes do fluido turbulento e as forças gravitacionais descendentes.

$$z = \frac{W}{\beta. K. u_*} \quad (81)$$

Calcula-se o parâmetro  $Z'$ , que é obtido pela equação 82: (valor de suspensão modificado).

$$Z' = Z + \varphi \quad (82)$$

Calcula-se então a relação  $a/d$  em que:

Se a relação  $a/d$  for menor ou igual 0,01, adotar o valor de 0,01.

Fator de correção da carga de sedimento em suspensão (F), equação 83:

$$F = \frac{\left[\frac{a}{d}\right]^Z - \left[\frac{a}{d}\right]^{1,2}}{\left[1 - \frac{a}{d}\right]^Z \cdot [1,2 - Z]} \quad (83)$$

E por fim determina-se a descarga de sedimentos em suspensão (Equação 79) e a descarga total pela equação 84:

$$Q_s = F \cdot U \cdot d \cdot Ca \quad (84)$$

$$qT = qb + qs \quad (85)$$

Onde  $qT$  também pode ser representada em ton/dia:

$$qT = 2,65 \cdot B \cdot qt \cdot 86400 \quad (86)$$

Van Rijn (1984) classifica também as formas de fundo em função do parâmetro de transporte  $T$  e do diâmetro característico  $D_{50}$  do material de fundo, conforme descrito a seguir:

Ripples: para  $D_{50} < 0,45$  mm e  $T < 3,0$ ;

Dunas: para  $D_{50} < 0,45$  mm e  $3,0 < T < 15,0$  e, para  $D_{50} > 0,45$  mm e  $0,4 < T < 15,0$ .

Transição para:  $15,0 < T < 25$

Fundo plano para:  $T > 25$

Sem movimento para:  $D_{50} > 0,45$  mm e  $T < 0,40$

#### 4.4.2.3 Cálculo de descarga sólida total a partir de medições de rios

##### 4.4.2.3.1 Método de Einstein modificado por Colby & Hembree (1955)

O método de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955) separa a descarga de sedimentos medida em suspensão e por arraste de fundo, obtendo-se a descarga total pela soma das duas parcelas.

Em comparação do método original de Einstein, Paiva (2007) descreve que o método modificado por Colby e Hembree apresentando uma série de fatores que distinguem esses dois procedimentos, citando que:

O método modificado de Einstein baseia-se em dados que podem ser observados em uma seção do rio e não necessariamente ao longo de um trecho considerado. A profundidade média é usada para substituir o raio hidráulico. O valor do parâmetro que quantifica a descarga de sedimentos por arraste é arbitrariamente dividido por dois para ajustar melhor os dados experimentais.

A metodologia de Colby e Hembree foi criada a partir de resultados de pesquisas em rios aluviais rasos e largos no Estado de Nebraska (EUA), em que, os dados necessários para a aplicação do método modificado de Einstein são: Vazão ( $m^3/s$ ), velocidade média do escoamento ( $m/s$ ), área da seção transversal ( $m^2$ ), largura da seção ( $m$ ), profundidade média das verticais de amostragens de sedimentos ( $m$ ), concentração de sedimentos em suspensão ( $ppm$ ), distribuição granulométrica de materiais de leito e suspensão coletados na seção considerada como também a temperatura da água.

As etapas para a aplicação do método modificado por Colby e Hembree (1955) são apresentadas por Paiva (2001), em que:

O cálculo da intensidade de atrito para cada fração individual de grão ( $\psi$ ), é apresentada pela equação 87 e 88, usando-se o maior valor calculado.

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D_{35}}{R \cdot S} \quad (87)$$

$$\psi = 0,4 \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D_i}{R \cdot S} \quad (88)$$

Onde:  $\rho$  e  $\rho_s$  são as massas específicas da água e do sedimento respectivamente,  $D_{35}$  o diâmetro da partícula,

para o qual 35% do material do leito, são mais finos,

$D_i$  o diâmetro do grão, da fração considerada,

$R \cdot S$  o produto do raio hidráulico pela declividade da linha de energia, calculado por iteração pela equação 89..

Para aplicar essa equação há necessidade primeiramente de arbitrar valores de  $X$  segundo a variação da Figura 12:

$$(SR)^{0,5} = \frac{U}{5,75 \cdot g^{0,5} \cdot \log \left[ \frac{12,27 \cdot X \cdot d}{D_{65}} \right]} \quad (89)$$

Onde:  $U$  é a velocidade do escoamento,  $x$  o fator de correção da distribuição logarítmica de velocidade, dado na Figura 9, com  $d$  substituindo o raio hidráulico e sendo  $\delta$  a espessura da subcamada limite laminar, dada pela equação 90:

$$\delta = 11,6 \frac{\nu}{u^*} \quad (90)$$

Em que:

$$u^* = (g \cdot d \cdot s)^{(1/2)} \quad (91)$$

$u^*$ : é a velocidade de atrito relativa aos grãos (velocidade de cisalhamento);

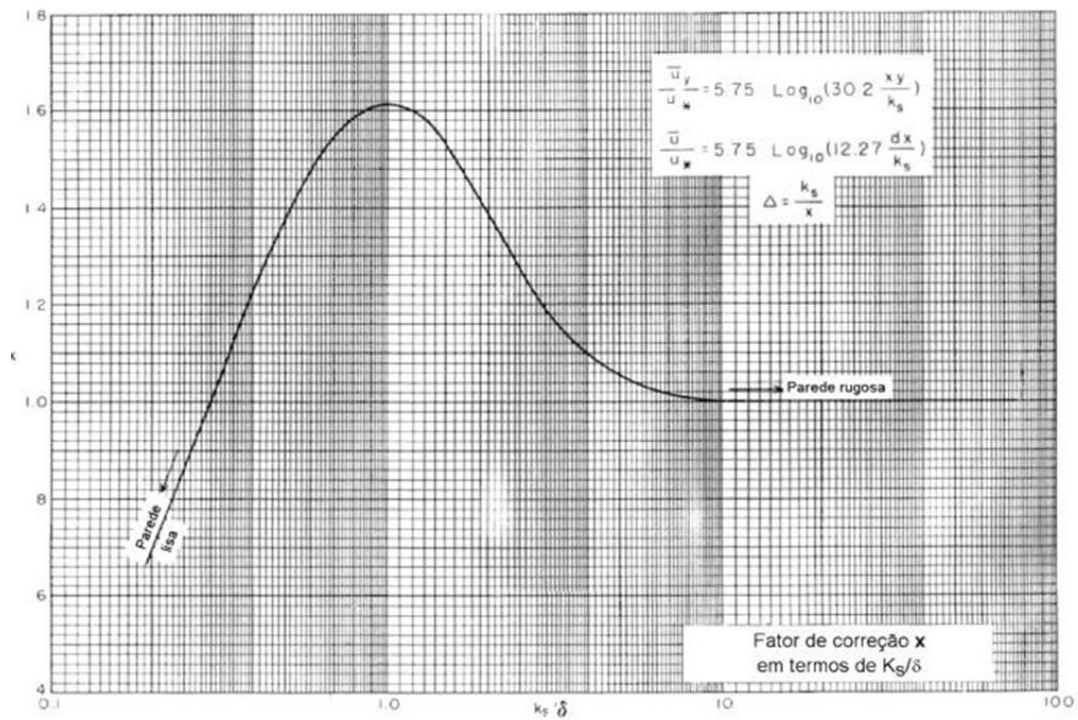
$\nu$ : viscosidade cinemática da água;

$S$ : declividade da linha de energia;

$d$ : profundidade do escoamento;

$D_{65}$ : diâmetro da partícula, para o qual 65% do material do leito, são mais finos.

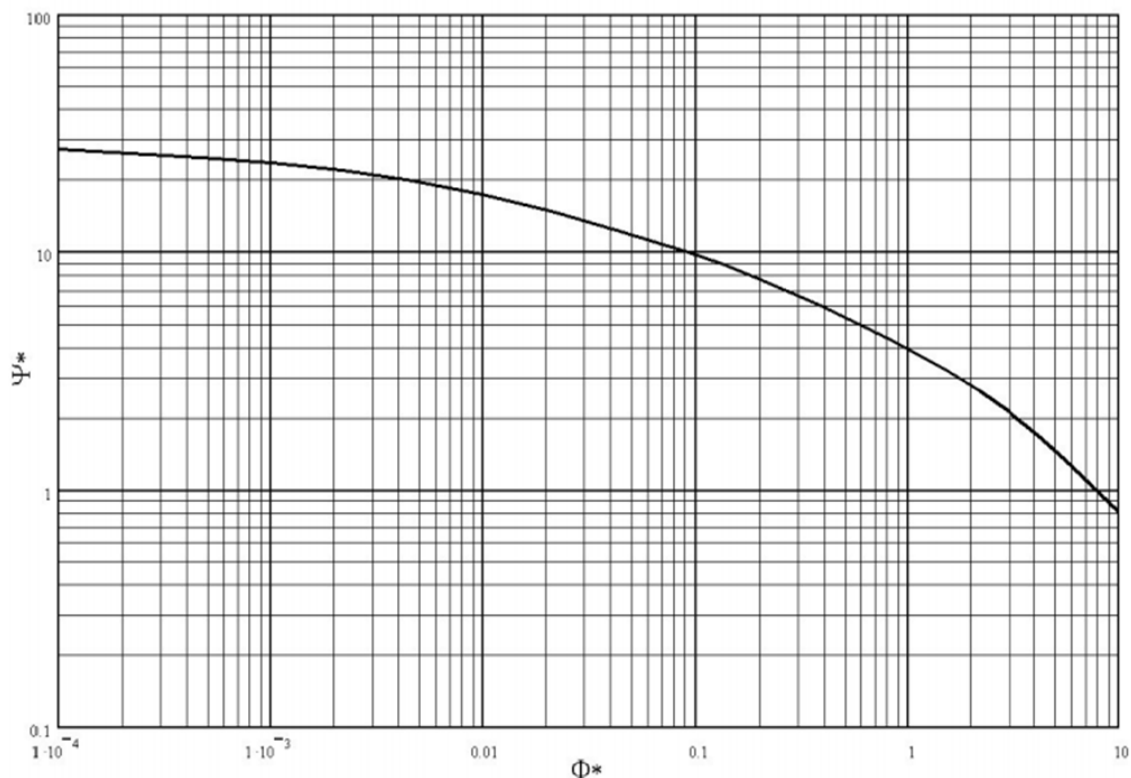
Figura 12 - Fator de correção da distribuição logarítmica da velocidade segundo Einstein (1950).



Fonte: Paiva (2001).

Após a determinação da intensidade de atrito pelas equações já descritas, calcula-se o a intensidade de transporte de fundo ( $\phi^*$ ), em que, esse valor pode ser obtido pela Figura 13 com  $\Psi$  substituindo  $\Psi^*$ .

Figura 13 - Ábaco da função de carga do fundo segundo Einstein (1950).



Fonte: Paiva (2001).

Para o cálculo da descarga de fundo, em peso por unidade de largura do canal, para cada fração de diâmetro é apresentada a seguinte equação 92.

$$i_B q_B = \frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot i_B \cdot \gamma_s \cdot [d' \cdot g \cdot D_i^3]^{0,5} \quad (92)$$

$$d' = \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \quad (93)$$

Onde:

$i_B$  : é a fração do material do leito de diâmetro  $D_i$ .

Para o cálculo da carga em suspensão, em peso por unidade de largura, para cada fração de diâmetro, é apresentada a equação 94:

$$q_{sri} = i_s \cdot \gamma \cdot C \cdot q \cdot \left[ (1 - E') - 2,3 \cdot \frac{E' \cdot \log E'}{Pm - 1} \right] \quad (94)$$

$$E' = \frac{a'}{dV} \quad (95)$$

$$Pm = 2,3 \cdot \log\left(\frac{30,2 \cdot x \cdot d}{D_{65}}\right) \quad (96)$$

Onde:

$i_s$ : é a fração do material em suspensão de diâmetro  $D_i$ ;

$C$ : concentração medida de sedimentos em suspensão;

$q$ : descarga líquida por unidade de largura do canal.

$a'$ : é a fração profundidade não amostrada;

$dv$ : a profundidade média nas verticais de amostragem e:

O expoente  $Z'$ , da distribuição de concentração de Rouse (1938), para cada fração de diâmetro, é calculado por tentativas, de modo a satisfazer a equação 97:

$$\frac{Q_{s'1}}{i_b \cdot Q_b} = \frac{q_{s'1} \cdot B}{B \cdot i_b \cdot Q_b} = \frac{I_1}{J_1} \cdot (Pm \cdot J'1 + J'2) \quad (97)$$

$$I1 = 0,216 \cdot \frac{E1^{z'-1}}{(1 - E1)^{z'} \cdot J} \quad (98)$$

$$J1' = \int_{E'}^1 \left(\frac{1-Y}{Y}\right)^{z'} \cdot dy \quad (99)$$

$$J2' = \int_{E'}^1 \left(\frac{1-Y}{Y}\right)^{z'} \cdot \ln y \cdot dy \quad (100)$$

$$E1 = \frac{2 \cdot D1}{d} \quad (101)$$

Em que os valores de  $I1$  podem ser obtidos na Figura 15 (a), os valores de  $I2$  em termos de  $E$  pela Figura 15 (b). Já para os valores de  $J1$  e  $J1'$  obtidas pela Figura 16 (a) e (b) e os valores de  $J2$  e  $J2'$ , pela Figura 17 (a) e (b). O procedimento original de Colby e Hembree (1955) para o cálculo de  $Z'$  é descrito por Paiva (2001) como segue:

Calcula-se o valor de  $Z'$  para o diâmetro de grão dominante na carga em suspensão por iteração de modo a satisfazer a equação 102, partindo com o valor inicial proposto por Hubbel (1964) obtido na Figura 14 e calculam-se os valores de  $Z'$  para as demais frações pela equação abaixo descrita:

$$\frac{Z'_i}{Z'_1} = \left(\frac{W_i}{W_1}\right)^{0,7} \quad (102)$$

Onde:

$Z'_1$ : valor de  $Z'$  para o grão dominante;

$w_1$ : velocidade de sedimentação do grão dominante e

$w_i$  é a velocidade de sedimentação da partícula de diâmetro  $D_i$ , dada pela equação 103 apresentada por Rubey (1933):

$$W = \frac{\left[\frac{2}{3} \cdot g \cdot \left(\frac{\gamma_s - 1}{\gamma}\right) \cdot D_i^3 + 36 \cdot v^2\right]^{1/2}}{D_i} \quad (103)$$

Determina-se então  $J_1$ ,  $J_1'$ ,  $J_2$  e  $J_2'$  pelas equações apresentadas respectivamente, ou pela Figura 13 (a) e (b) conforme já mencionado:

a) Calcula-se  $I_1$  pela equação 98 ou pela Figura 15 (a) e  $I_2$  pela Figura 15 (b) ou pela equação 104:

$$I_2 = 0,216 \cdot \frac{E1^{Z-1}}{(1-E1)^Z} \int_{E1}^1 \left(\frac{1-Y}{Y}\right)^Z \cdot \ln y \cdot dy \quad (104)$$

b) Calcula-se também para cada fração de diâmetro, a carga total de sedimentos pelas equações abaixo descritas:

Para sedimentos finos provenientes da bacia hidrográfica (*wash load*), equação 105.



$$i_T \cdot Q_T = Q_S' i_s \cdot \frac{P_m \cdot J_1 + J_2}{P_m J_1' + J_2'} \quad (105)$$

Para sedimentos grossos (*bed load*), equação 106.

$$i_T \cdot Q_T = i_b \cdot Q_b \cdot (P_m \cdot I_1 + I_2 + 1) \quad (106)$$

Figura 14 – 4 Valores de Z' em função de Q's / if.Qf, para o grão dominante segundo Colby e Hubel (1964). Fonte: Paiva (2001).

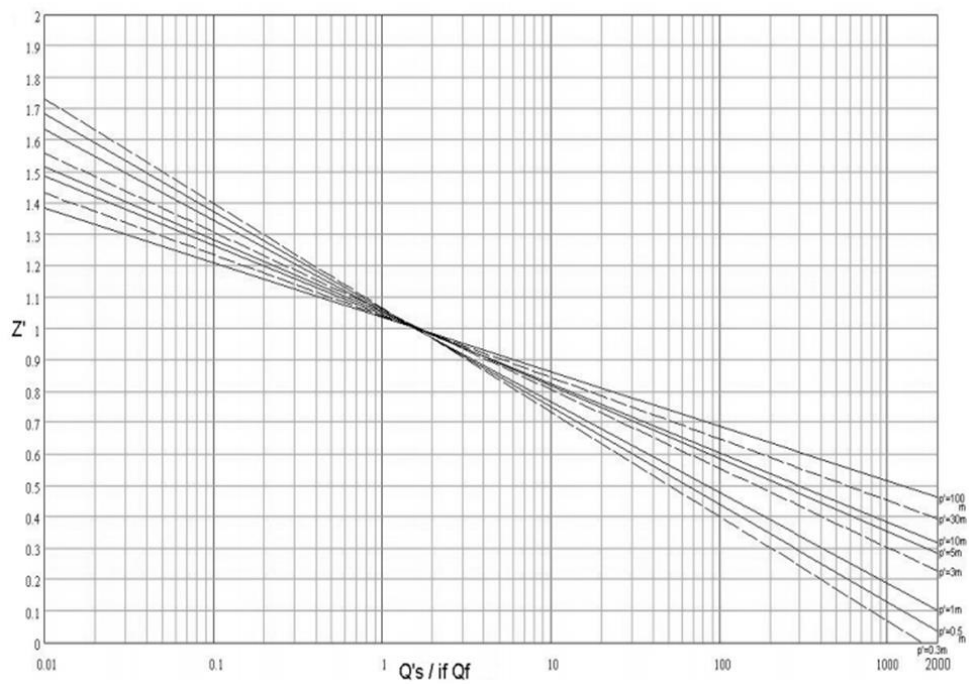


Figura 15 - (a) Valores de  $I_1$ , em termos de  $E$ , para vários valores de  $z$ ; (b) Valores de  $I_2$ , em termos de  $E$ , para vários valores de  $Z$ , segundo Einstein (1950). Fonte: Julien et. Al. (1995).

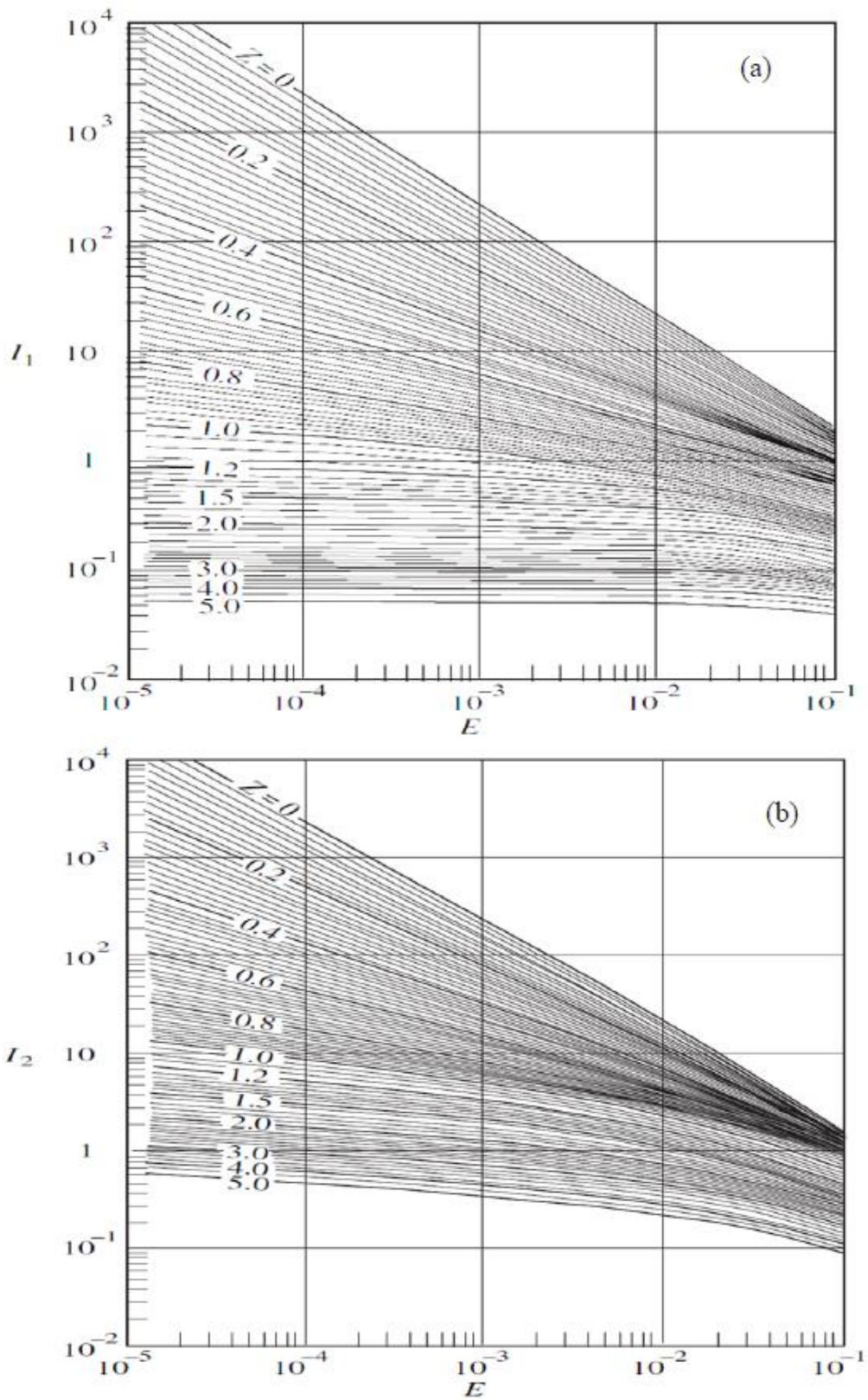


Figura 16 -(a) Integral de  $J_1$  em termos de  $E1$  e  $Z'$ ; (b) Integral de  $J_1$  em termos de  $E1$  e  $Z'$ , segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).

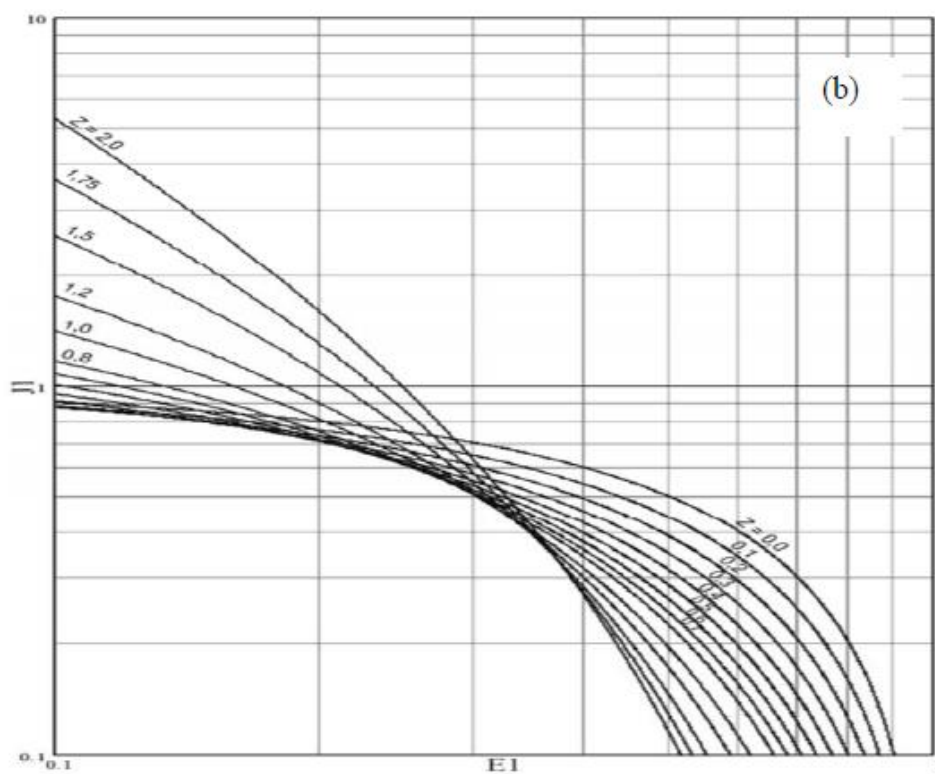
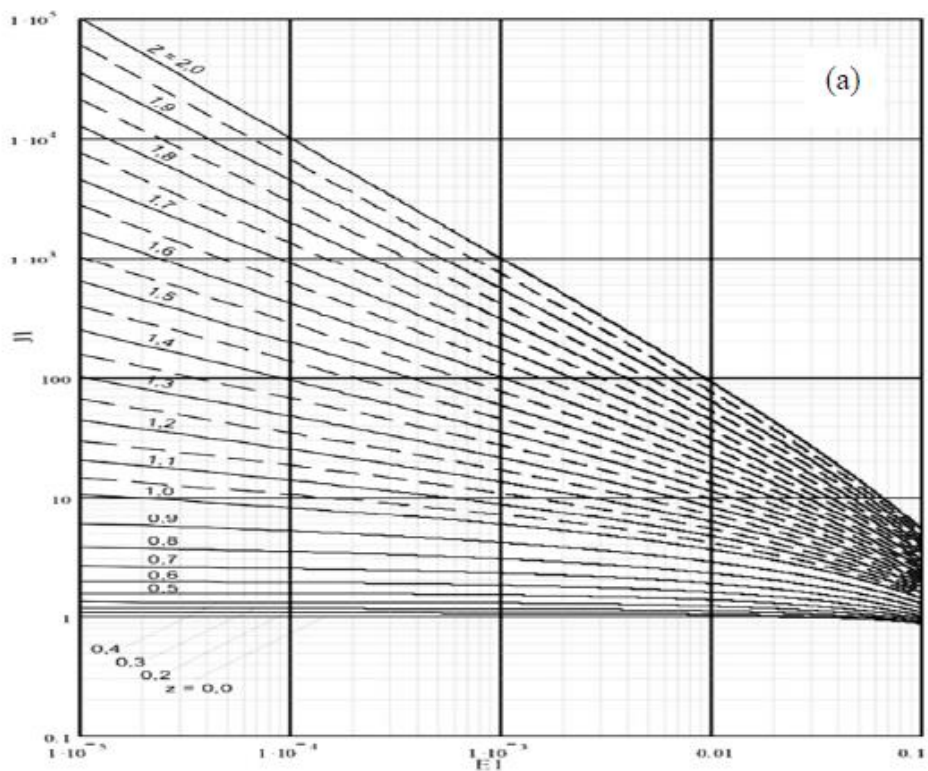
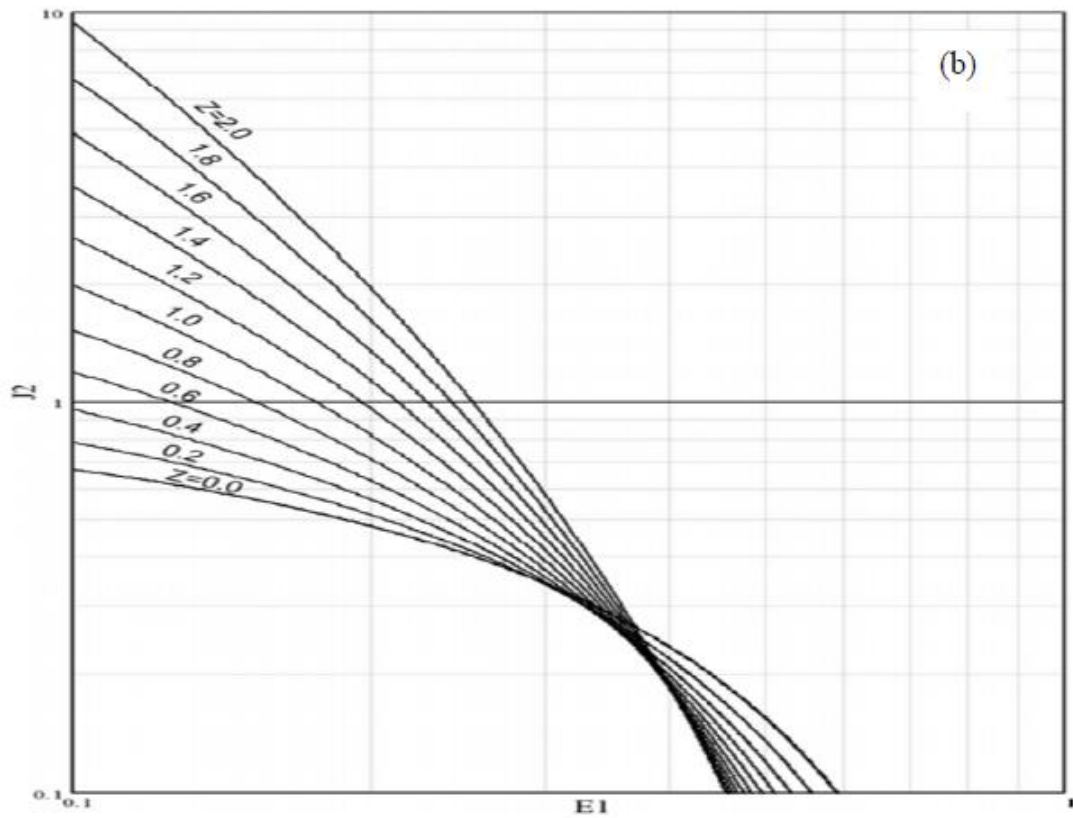
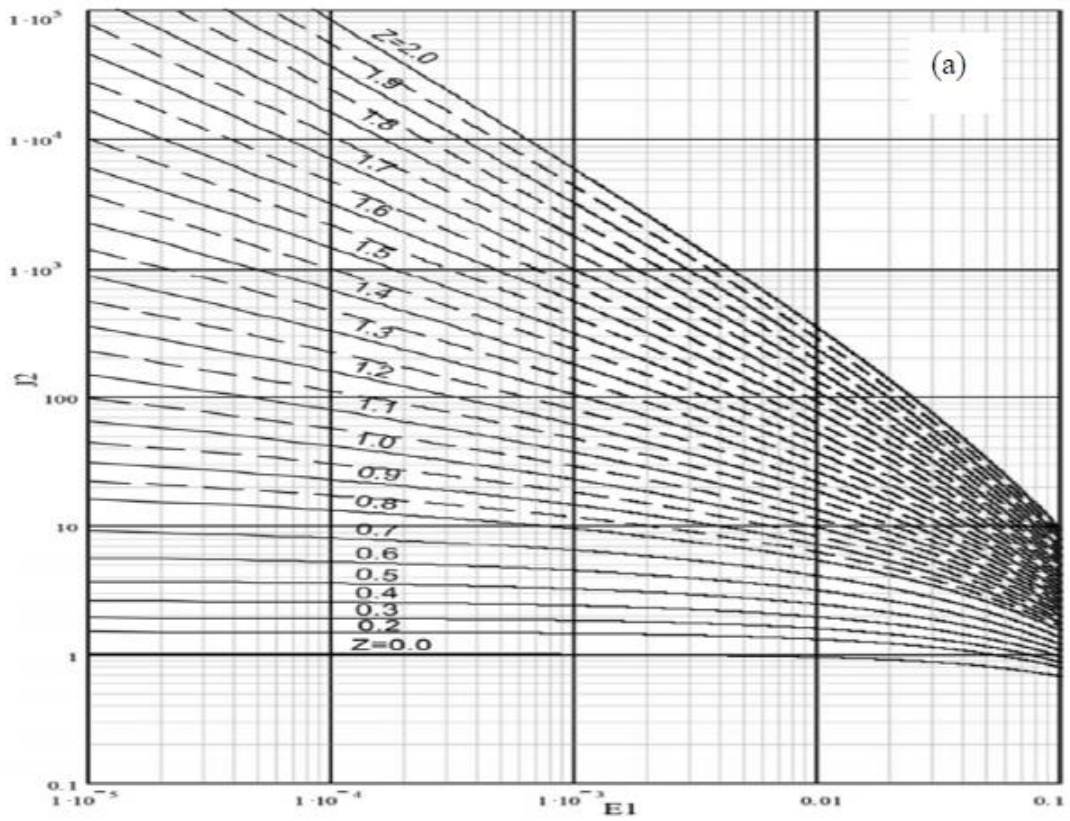


Figura 17-(a) Integral de  $J_2$  em termos de  $E_1$  e  $Z'$  6b; (b) Integral de  $j_2$  em termos de  $E_1$  e  $z'$  segundo Colby e Hembree (1955). Fonte: Paiva (2001).



#### 4.4.2.3.2 Método de Colby (1957)

Segundo Carvalho (2008) e Paiva (1988) o método de Colby é vantajoso devido à sua aplicação direta e pelo uso de poucos dados, necessitando apenas de informações das medições da descarga líquida e da concentração de sedimentos em suspensão. Como também dados da profundidade média, velocidade média do escoamento e da largura da seção transversal.

Segundo Carvalho (2008), a descarga sólida medida ( $Q_{sm}$ ) em ton/dia é obtida pela equação 107.

$$Q_{sm} = 0,0864 Q \cdot C'_s \quad (107)$$

Onde  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ );

$C'_s$  a concentração de sedimentos em suspensão (ppm).

O cálculo da descarga sólida não medida ( $Q'_{nm}$ ) em ton/dia, que corresponde a descarga de fundo (não amostrada), que pode ser obtida pela equação 108 ou pela Figura 18:

$$\log Q'_{nm} = 3,432 \log U + B \quad (108)$$

Onde  $U$  é a velocidade média e  $B$  a largura da seção transversal.

A concentração relativa ( $C_r$ ) é calculada pela equação 109.

$$\log C_r = A \cdot \log U + B \quad (109)$$

Onde  $A$  e  $B$  são valores decorrente da profundidade do escoamento ( $D$ ), obtido pela Tabela 5 de acordo com Paiva (1988).

Tabela 5 - Valores de A e B para Cr em função da profundidade média

D(m)	A	B
<0,35	1,8066	3,2627
0,35 a 0,45	1,8365	3,176
0,45 a 0,55	1,9111	3,1139
0,55 a 0,65	1,9512	3,0881
0,65 a 0,75	1,973	3,0512
0,75 a 0,85	1,9897	3,0212
0,85 a 0,95	1,8213	2,9289
0,95 a 1,10	2,0388	2,9692
1,1 a 1,30	1,9069	2,9002
1,30 a 1,50	2,1377	2,9031
1,50 a 1,70	2,1772	2,8642
1,9 a 2,50	2,2393	2,7782
2,50 a 3,50	2,2319	2,699
3,50 a 4,50	2,454	2,6236
4,50 a 5,50	2,5129	2,5446
5,50 a 6,50	2,5727	2,4914
6,50 a 7,50	2,6857	2,4651
7,50 a 8,50	2,6674	2,3979
8,50 a 9,50	2,7665	2,3696
9,50 a 11,0	2,8102	2,3224
11,0 a 13,0	2,9199	2,2304
13,0 a 15,0	3,0768	2,1303
15,0 a 17,0	3,1964	2,0414
17,0 a 19,0	3,3046	1,959
19,0 a 21,0	3,419	1,8554
21,0 a 23,0	3,5844	1,7661
23,0 a 25,0	3,5913	1,6532
25,0 a 27,0	3,5476	1,5341
27,0 a 29	3,9694	1,4639
29,0 a 31,0	4,1821	1,3441

Fonte: Paiva(1988)

A razão da eficiência é calculada pela equação 110.

$$e = C'_s / C_r \quad (110)$$

O fator de correção (K) é estimado pela equação 111:

$$\log K = 0,4732 \cdot \log \left( \frac{C'_s}{C_r} \right) + 0,0753 \quad (111)$$

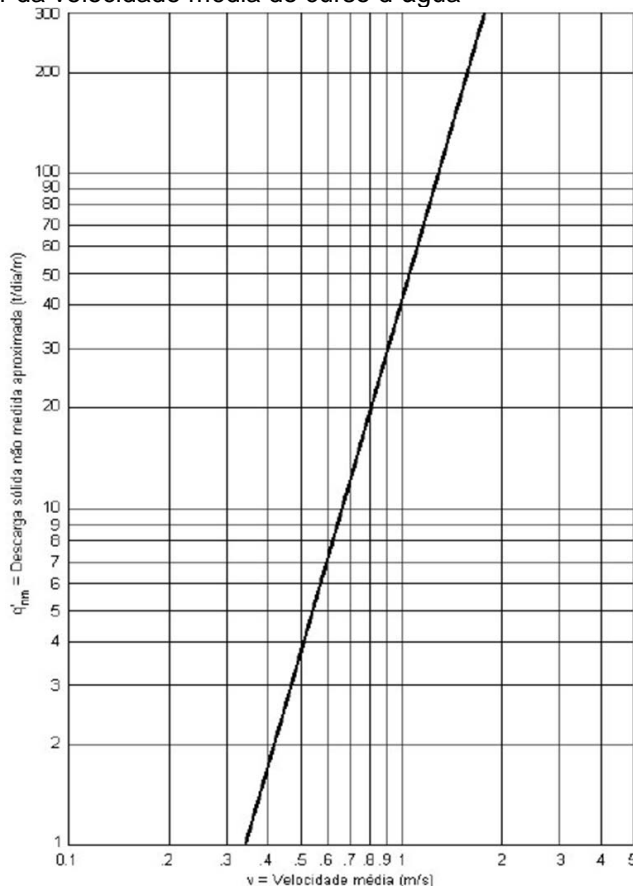
Calcula-se então a descarga sólida não medida com a expressão 112.

$$Q_{nm} = q'_{nm} \cdot B \cdot K \quad (112)$$

Então, a descarga sólida total ( $Q_{st}$ ) em ton/dia é obtida pela soma da descarga sólida medida com a descarga sólida não medida, equação 113.

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (113)$$

Figura 18 - Obtenção da descarga sólida não medida aproximada, por metro de largura do rio, a partir da velocidade média do curso d'água



Fonte: Carvalho (2008)

#### 4.5 Avaliação temporal do transporte de sedimentos na seção

A avaliação temporal do transporte de sedimentos no rio Vacacaí Mirim foi realizada de modo comparativo, por meio de dados de Paiva (2011), dados obtidos por Rizzardi (2013) e dos resultados obtidos no monitoramento deste estudo.

Na tabela 6 é apresentada a origem e o período de dados utilizados na avaliação temporal do transporte de sedimentos no rio Vacacaí Mirim.

Tabela 6 - Origem e período de monitoramento utilizados na avaliação temporal do transporte de sedimentos no rio Vacacaí Mirim

<b>Origem dos dados</b>	<b>Período utilizado</b>
Paiva (2011)	25/09/2007 a 03/10/2010
Rizzardi (2013)	08/09/2011 a 07/07/2012
Neste estudo	02/10/2014 a 03/12/2015

Foram levados em consideração na avaliação temporal do transporte de sedimentos na seção, uso e ocupação do solo na bacia e os períodos de preparo do solo para cultivo.

#### **4.5 Avaliação da influência das precipitações sobre a descarga líquida e no transporte de sedimentos**

Para a análise da influência das precipitações sobre a descarga líquida (Q), concentração de sedimentos em suspensão (CSS), descarga sólida em suspensão (Q<sub>ss</sub>) e descarga sólida total (Q<sub>st</sub>) foram utilizados dados disponíveis das estações pluviométricas da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do banco de dados do grupo GHIDROS.

Foram consideradas as médias mensais de chuva das séries históricas e médias mensais ocorridas nos períodos avaliados, chuvas antecedentes aos eventos monitorados. Para fins de padronização considerou-se dois dias sem precipitação para considerar a chuva para o respectivo evento, levando em consideração o tempo de concentração (46 horas) obtido para a bacia em estudo.



#### 4.6 Análise Estatística

Após as coletas das informações a campo, os dados obtidos foram organizados e analisados estatisticamente, obtendo-se média ( $\mu$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ), mediana, coeficiente de variação (CV) e coeficiente de determinação ( $r^2$ ).

Para avaliar os resultados obtidos pelos métodos de estimativa da descarga sólida aplicados, foi utilizado o Índice de Dispersão (ID) apresentado por Aguirre et al. (2004) utilizados por Scapin (2005) e Rizzardi (2013) em seus estudos. Este índice proposto pelo autor indica que o uso de um método só será possível se o ID for menor ou igual a 10. O ID é determinado pelas equações 114, 115 e 116.

$$ID = \frac{MNE}{100} MPF \quad (114)$$

$$MNE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{mi} - X_{ci}}{X_{mi}} \right| \quad (115)$$

$$MPF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{maior de} \left( \frac{X_{mi}}{X_{ci}}, \frac{X_{ci}}{X_{mi}} \right) \quad (116)$$

Onde:

MNE: erro médio normalizado; MPF: Fator médio de estimativa;  $X_{mi}$ : valores medidos das variáveis hidráulicas e  $X_{ci}$ : valores calculados das variáveis hidráulicas.



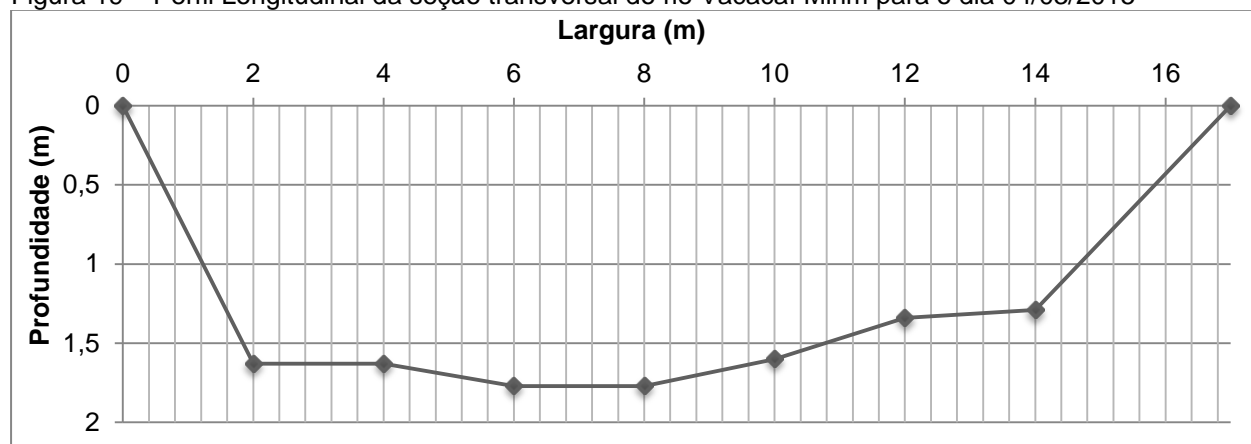
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de 02 de outubro de 2014 a 03 de dezembro de 2015, foram realizadas 16 campanhas, sendo 16 para determinação da descarga líquida e 13 para a determinação da descarga sólida.

### 5.1 Características hidráulicas e geométricas na seção transversal do rio Vacacaí Mirim

Nos perfis longitudinais da seção em estudo para o período de 2014 e 2015 observa-se que o rio apresenta dois níveis ou calhas dependentes da cota observada. Na figura 19 é apresentado o perfil longitudinal para o dia 04/03/2015, com a menor cota observada (2,46 m) nos eventos monitorados, no período de 2014 a 2015 para a seção transversal do rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca.

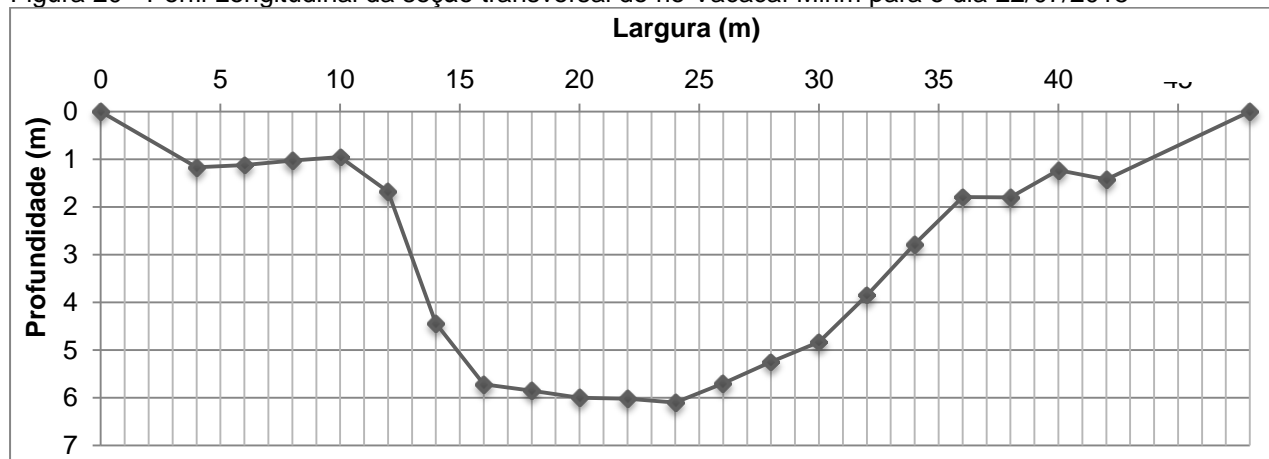
Figura 19 – Perfil Longitudinal da seção transversal do rio Vacacaí Mirim para o dia 04/03/2015



Observa-se que para a menor cota observada a profundidade máxima da seção foi de 1,77 m com uma largura de 16 m, e uma área de aproximadamente 29 m<sup>2</sup>.

Na figura 20 é apresentado o perfil longitudinal para o dia 22/07/2015, com a maior cota observada (6,84 m) nos eventos monitorados no período de 2014 a 2015 para a seção transversal do rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca.

Figura 20 - Perfil Longitudinal da seção transversal do rio Vacacaí Mirim para o dia 22/07/2015



Para a maior cota observada a profundidade máxima da seção foi de 6,10 m com uma largura de 145 m, totalizando uma área de aproximadamente 884 m<sup>2</sup>. Observa-se que a seção de monitoramento do rio Vacacaí Mirim apresenta uma calha menor, demonstrada no perfil do evento de 04/03/2015 (figura 19) e uma calha maior que foi alcançada no evento de 22/07/2015.

Destaca-se que não foi observado o extravasamento da calha do rio. Na maioria dos eventos o rio permanece na calha menor, apenas atingindo a calha maior em eventos de cotas mais elevadas como a registrada em dia 22/07/2015.

Na tabela 7 são apresentados os resultados das 16 medições de descarga líquida e das 13 de descarga sólida, assim como, as características hidráulicas e geométricas, e a estatística descritiva dos dados obtidos na seção do rio Vacacaí Mirim

Tabela 7 - Características hidráulicas e geométricas na seção transversal de Restinga Sêca

Medição	Data	A (m <sup>2</sup> )	B(m)	Pm(m)	V (m/s)	Rh(m)	S(m/m)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s) 10 <sup>-6</sup>	d(m)	H(m)	Q(m <sup>3</sup> /s)
1	02/10/2014	85,74	26,00	29,23	0,631	2,934	0,00079	1,1460	3,298	5,58	54,13
2	22/10/2014	106,18	43,00	45,56	0,504	2,331	0,00068	0,9664	2,469	5,97	53,46
3	06/11/2014	77,64	24,00	26,78	0,594	2,899	0,00071	0,9461	3,235	5,12	46,14
4	04/12/2014	26,13	17,00	18,35	0,366	1,424	0,00081	0,9258	1,537	2,55	10,33
5	23/12/2014	79,24	27,00	29,51	0,556	2,685	0,00068	0,9461	2,935	5,93	44,02
6	16/01/2015	76,04	25,00	27,48	0,524	2,767	0,00059	0,9664	3,042	4,91	39,86
7	04/03/2015	22,71	17,00	17,88	0,382	1,270	0,00088	0,8852	1,336	2,46	8,68
8	01/04/2015	63,61	23,00	25,26	0,521	2,519	0,00066	1,0070	2,766	4,40	33,13
9	29/05/2015	88,08	26,00	28,97	0,567	3,040	0,00061	1,1182	3,388	5,47	49,96
10	16/07/2015	95,08	34,00	36,38	0,476	2,614	0,00052	1,1460	2,796	5,80	45,23
11	22/07/2015	141,47	48,00	51,21	0,582	2,763	0,00072	1,1460	2,947	6,84	82,31
12	06/08/2015	54,58	22,00	24,06	0,538	2,269	0,00080	1,0348	2,481	4,27	29,34
13	25/09/2015	118,77	41,56	42,99	0,435	2,763	0,00040	0,9461	2,684	6,23	51,66
14	14/10/2015	123,05	46,44	44,54	0,429	2,763	0,00039	1,0348	2,671	6,20	52,82
15	06/11/2015	47,52	17,04	17,20	0,417	2,762	0,00039	1,0626	2,197	5,10	20,29
16	03/12/2015	32,11	18,00	22,55	0,374	1,424	0,00072	0,9461	1,780	2,84	12,02
Máximo		141,47	48,00	51,21	0,63	3,04	0,00088	1,1460	3,39	6,84	82,31
Mínimo		22,71	17,00	17,20	0,37	1,27	0,00039	0,8852	1,34	2,46	8,68
Média ( $\mu$ )		77,37	28,44	30,50	0,49	2,45	0,00065	1,0140	2,60	4,98	39,59
Mediana		78,44	25,50	28,23	0,51	2,72	0,00068	0,9867	2,73	5,29	44,63
Desvio padrão ( $\sigma$ )		35,12	10,77	10,61	0,08	0,57	0,00015	0,0871	0,61	1,35	19,74
CV(%)		45,40	37,86	34,78	17,09	23,33	23,70	8,59	23,54	27,15	49,85

A: área, B: largura, Pm: perímetro molhado, V: velocidade média, Rh: raio hidráulico, S: declividade,  $\nu$ : viscosidade cinemática, d: profundidade média, H: cota, Q: vazão, Qst: descarga sólida total,

Destacam-se as faixas de variação de cada parâmetro avaliado durante o monitoramento na seção de Restinga Seca: área da seção transversal (22,71 a 141,47 m<sup>2</sup>), perímetro molhado (17,00 a 51,21 m), raio hidráulico (1,27 a 3,04 m), declividade da linha d'água (0,00039 a 0,00088 m/m), largura da seção transversal (17 a 48 m), velocidade média (0,37 a 0,63 m/s), profundidade média (1,34 a 3,39 m) e vazão (8,678 a 82,31 m<sup>3</sup>/s).

O valor da viscosidade da água adotado variou com a temperatura medida em cada medição, oscilando de 15°C a 26°C e viscosidade cinemática de  $1,1460 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s a  $0,8852 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

No dia 4/03/2015 ocorreram as menores descargas líquidas (8,68 m<sup>3</sup>/s) e descarga sólida total (24,511 ton/dia), no dia 22/07/2015 ocorreu a maior descarga líquida (82,31 m<sup>3</sup>/s) e no dia 22/10/2014 ocorreu a maior descarga sólida total (850,503 ton/dia) do período do estudo atual.

Na tabela 8 são apresentados os resultados obtidos e a estatística descritiva para as amostras após secagem em estufa a 105 °C e após a queima da matéria orgânica na mufla a temperatura de 500 °C.

Tabela 8 – Valores de concentração de sedimentos em suspensão. descargas sólidas , matéria orgânica

Medição	Data	H(m)	Q(m³/s)	Css (mg/L) *	Css (mg/L) **	MO (mg/L)	Qss (ton/dia) *	Qss (ton/dia) **	Qsf (ton/dia) *	Qsf (ton/dia) **	QsT (ton/dia) *	QsT (ton/dia) **
1	02/10/2014	5,58	54,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	22/10/2014	5,97	53,46	714,740	183,960	530,780	3301,468	849,733	0,809	0,673	3302,276	850,406
3	06/11/2014	5,12	46,14	722,340	181,430	540,910	2879,543	723,254	0,765	0,670	2880,308	723,924
4	04/12/2014	2,55	10,33	53,151	37,230	15,921	50,140	48,359	0,412	0,395	50,552	48,754
5	23/12/2014	5,93	44,02	107,950	99,342	8,608	410,579	377,839	0,627	0,624	411,205	378,463
6	16/01/2015	4,91	39,86	59,230	49,518	9,712	204,003	170,552	0,537	0,534	204,540	171,086
7	04/03/2015	2,46	8,68	47,370	32,687	14,683	35,517	24,508	0,396	0,386	35,913	24,894
8	01/04/2015	4,40	33,13	106,297	53,035	53,262	304,277	151,814	0,574	0,525	304,851	152,339
9	29/05/2015	5,47	49,96	69,934	69,304	0,630	301,897	301,897	0,600	0,590	302,497	302,487
10	16/07/2015	5,80	45,23	23,030	21,016	2,014	90,000	82,130	0,480	0,480	90,481	82,610
11	22/07/2015	6,84	82,31	74,634	18,173	56,461	530,760	129,237	0,723	0,596	531,483	129,833
12	06/08/2015	4,27	29,34	95,677	78,708	16,969	242,539	199,523	0,576	0,553	243,115	200,076
13	25/09/2015	6,23	51,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	14/10/2015	6,20	52,82	85,815	15,627	70,188	391,629	71,316	0,573	0,558	392,202	71,874
15	06/11/2015	5,10	20,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	03/12/2015	2,84	12,02	97,758	59,710	38,048	101,482	238,320	0,420	0,390	101,902	62,375
Máximo		6,84	82,31	722,340	183,960	540,910	3301,468	849,733	0,809	0,673	3302,276	850,406
Mínimo		2,46	8,68	23,030	15,627	0,630	35,517	24,508	0,396	0,386	35,913	24,894
Média (μ)		4,98	39,59	173,687	69,211	104,476	680,295	259,114	0,576	0,536	680,871	246,086
Mediana		5,29	44,63	85,815	53,035	16,969	301,897	170,552	0,574	0,553	302,497	152,339
Desvio padrão (σ)		1,35	19,74	243,080	56,016	192,731	1083,399	256,001	0,132	0,099	1083,504	261,880
CV(%)		27,15	49,85	139,953	80,936	184,474	159,254	98,799	22,913	18,540	159,135	106,418

\*pós estufa ,\*\*pos mufla, H: cota, Q: vazão, Css: concentração de sedimentos em suspensão, MO: Matéria Orgânica, Qss: Descarga sólida em suspensão, Qsf: Descarga de sedimento de fundo, Qst: descarga sólida total,,

Na Tabela 8 destaca-se os valores para as faixas de variação para cada medição onde a  $C_{ss}$  pós estufa foi de 23,03 mg/L a 722,340 mg/L e para a  $C_{ss}$  pós mufla foi de 15,627 mg/L a 183,960 mg/L . Estas diferenças entre  $C_{ss}$  pós estufa e pós mufla resultaram nos valores de matéria orgânica (MO) apresentando valor mínimo de 0,630 mg/L e valor máximo de 540 mg/L.

A  $Q_{ss}$  pós estufa apresenta mínimo de 35,517 ton/dia e máximo de 3301,468 ton/dia e pós mufla mínimo de 24,508 ton/dia e máximo de 849,733 ton/dia. Já a  $Q_{sf}$  pós estufa apresenta mínimo de 0,396 ton/dia e máximo de 0,809 ton/dia e pós mufla mínimo de 0,386 ton/dia e máximo de 0,673 ton/dia. Para  $Q_{sT}$  pós estufa apresenta mínimo de 35,913 ton/dia e máximo de 3302,276 ton/dia e pós mufla valor de 24,894 ton/dia e máximo de 850,406 ton/dia.

Existem diferenças entre os valores para  $C_{ss}$ ,  $Q_{ss}$ ,  $Q_{sf}$  e  $Q_{sT}$  para pós estufa e pós mufla. Pode atribui-se a diferença a matéria orgânica(MO) indicando que a escolha de certas técnicas de análise em laboratório, descritas nos materiais e métodos, podem sub/super estimar os resultados.

## 5.2 Análise granulométrica e diâmetros característicos

Para a avaliação granulométrica do material amostrado, utilizou-se a classificação proposta pela AGU (*American Geophysical Union*), transcrita pelo DNAEE (1970), em que a variação granulométrica correspondente para Argila: 0,00024 – 0,004 mm; Silte: 0,004 – 0,0625 mm; Areia: 0,0625 – 2 mm e Cascalho: 2–64 mm.

Na tabela 9 são apresentados os resultados obtidos, para os diâmetros característicos dos sedimentos do material de arraste de fundo após queima da matéria orgânica e estatística descritiva da seção transversal de Restinga Sêca.



Tabela 9 - Diâmetros característicos das amostras de material arraste de fundo

Medição	Data	Q (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>ss</sub> (mg/L)	Diâmetro Característico (mm)						
				D10	D16	D35	D50	D65	D84	D90
1	02/10/2014	54,13	-	-	-	-	-	-	-	-
2	22/10/2014	53,46	183,96	0,285	0,375	0,600	0,735	0,885	0,975	0,995
3	06/11/2014	46,14	181,43	0,265	0,285	0,335	0,385	0,440	0,490	0,700
4	04/12/2014	10,33	54,16	0,150	0,205	0,265	0,320	0,380	0,455	0,480
5	23/12/2014	44,02	99,34	0,175	0,230	0,320	0,385	0,440	0,685	0,885
6	16/01/2015	39,86	49,52	0,255	0,275	0,340	0,390	0,440	0,520	0,720
7	04/03/2015	8,68	32,69	0,130	0,145	0,195	0,225	0,280	0,420	0,455
8	01/04/2015	33,13	53,04	0,200	0,260	0,350	0,425	0,505	0,825	0,920
9	29/05/2015	49,96	69,93	0,260	0,295	0,460	0,610	0,765	0,975	-
10	16/07/2015	45,23	21,02	0,245	0,270	0,325	0,375	0,420	0,480	0,495
11	22/07/2015	82,31	18,17	0,255	0,265	0,33	0,375	0,425	0,485	0,505
12	06/08/2015	29,34	78,71	0,150	0,180	0,265	0,325	0,385	0,470	0,490
13	25/09/2015	51,66	-	-	-	-	-	-	-	-
14	14/10/2015	52,82	15,63	0,185	0,230	0,3	0,380	0,440	0,660	0,805
15	06/11/2015	20,29	-	-	-	-	-	-	-	-
16	03/12/2015	12,02	59,71	0,105	0,135	0,175	0,205	0,235	0,395	0,445
Máximo		82,31	183,96	0,285	0,375	0,600	0,735	0,885	0,975	0,995
Mínimo		8,68	15,63	0,105	0,135	0,175	0,205	0,235	0,395	0,445
Mediana		44,63	54,16	0,200	0,260	0,325	0,380	0,440	0,490	0,603
Média ( $\mu$ )		39,59	70,56	0,205	0,242	0,328	0,395	0,465	0,603	0,658
Desvio Padrão ( $\sigma$ )		19,74	55,40	0,055	0,059	0,103	0,135	0,170	0,203	0,202
CV (%)		49,85	78,52	29,13	27,02	33,19	35,77	38,04	31,24	29,11

:- Diâmetros característicos obtidos foram inferiores

Encontrou-se para os diâmetros característicos das amostras de material arraste de fundo, os menores diâmetros característicos em 03/12/2015 e 22/10/2014 os maiores valores de diâmetros característicos.

Para a seção do rio Vacacaí Mirim, Restinga Sêca observou-se para os diâmetros característicos do material de arraste de fundo D10, D16, D35, D50, D65, D84 e D90 os diâmetros mínimos de 0,105; 0,135; 0,175; 0,205; 0,235; 0,395 e 0,445 mm respectivamente em 03 de dezembro de 2015 com Q=12,02 m<sup>3</sup>/s e C<sub>ss</sub>=59,71 mg/L..

Os diâmetros máximos encontrados para D10, D16, D35, D50, D65, D84 e D90 foram 0,285; 0,375; 0,600; 0,735; 0,885; 0,975 e 1,100 respectivamente em 22 de outubro de 2015 para Q= 53,46 m<sup>3</sup>/s e C<sub>ss</sub>= 183,96 mg/L.

Na tabela 10 são apresentados os resultados obtidos, para as frações granulométricas dos sedimentos do material de arraste de fundo da seção transversal de Restinga Sêca.

Tabela 10 – Análise granulométrica das frações do material arraste de fundo

	Frações granulométricas	
	Areia(%)	Silte+ argila( %)
22/10/2014	75,82	24,18
06/11/2014	93,31	6,69
04/12/2014	99,4	0,6
16/12/2014	97,92	2,08
23/12/2014	93,22	6,78
16/01/2015	99,18	0,82
04/03/2015	99,2	0,82
01/04/2015	94,6	5,39
29/05/2015	87,3	12,74
16/07/2015	98,6	1,36
22/07/2015	99,7	0,31
06/08/2015	93,8	6,19
14/10/2015	97,3	2,71
03/12/2015	99,2	0,76
Máximo	99,69	24,18
Mínimo	75,82	0,31
Mediana	97,605	2,395
Média( $\mu$ )	94,89786	5,102142857
Desvio Padrao ( $\sigma$ )	6,542907	6,542907115
CV (%)	6,894684	128,2384147

Quanto à avaliação granulométrica para o material de arraste de fundo existe a predominância de areia (94,55 %). No dia 22 de outubro de 2014 observou-se o menor valor da fração areia 75,82%.

Na tabela 11 são apresentados os resultados obtidos, nas medições, para os diâmetros característicos dos sedimentos do material de leito. Em 03/12/2015 foram obtidos os menores diâmetros característicos obtidos para o material de leito e em 22/10/2014 foram encontrados os maiores diâmetros característicos.

Quando se comparam as médias dos diâmetros característicos encontrados para material de leito e material de arraste de fundo nota-se que apresentam diâmetros característicos menores o material de leito.

Tabela 11 - Diâmetros característicos das amostras de material de leito

Medição	Data	Q (m <sup>3</sup> /s)	Css (mg/L)	Diâmetro Característico (mm)						
				D10	D16	D35	D50	D65	D84	D90
1	02/10/2014	54,13	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
2	22/10/2014	53,46	183,96	0,265	0,300	0,390	0,485	0,620	0,865	0,925
3	06/11/2014	46,14	181,43	0,235	0,265	0,320	0,365	0,425	0,475	0,495
4	04/12/2014	10,33	54,16	0,180	0,250	0,340	0,395	0,595	0,765	0,910
5	23/12/2014	44,02	99,34	0,165	0,195	0,300	0,365	0,420	0,510	0,710
6	16/01/2015	39,86	49,52	0,200	0,250	0,310	0,360	0,410	0,480	0,485
7	04/03/2015	8,68	32,69	0,255	0,275	0,345	0,405	0,465	0,715	0,820
8	01/04/2015	33,13	53,04	0,125	0,165	0,275	0,335	0,395	0,470	0,540
9	29/05/2015	49,96	69,93	0,160	0,205	0,335	0,435	0,615	0,990	-
10	16/07/2015	45,23	21,02	0,160	0,195	0,300	0,405	0,520	-	-
11	22/07/2015	82,31	18,17	0,185	0,235	0,300	0,350	0,400	0,455	0,475
12	06/08/2015	29,34	78,71	0,185	0,235	0,305	0,355	0,405	0,460	0,480
13	25/09/2015	51,66	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
14	14/10/2015	52,82	15,63	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
15	06/11/2015	20,29	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
16	03/12/2015	12,02	59,71	0,090	0,125	0,260	0,340	0,420	0,680	0,925
Máximo		82,31	183,96	0,265	0,300	0,390	0,485	0,620	0,865	0,925
Mínimo		8,68	15,63	0,090	0,125	0,260	0,335	0,395	0,455	0,475
Mediana		44,63	54,16	0,183	0,235	0,308	0,365	0,423	0,510	0,625
Média ( $\mu$ )		39,59	71,47	0,192	0,234	0,320	0,387	0,479	0,605	0,649
Desvio Padrão ( $\sigma$ )		19,74	55,31	0,041	0,038	0,030	0,042	0,087	0,164	0,182
CV (%)		49,85	77,39	21,45	16,40	9,28	10,86	18,20	30,46	28,07

sms : sem medição de sedimento,

-: Diâmetros característicos obtidos foram inferiores

Observou-se que quanto aos diâmetros característicos obtidos na seção do rio Vacacaí Mirim, Restinga Sêca para o material de leito D10, D16, D35, D50, D65, D84 e D90 os diâmetros mínimos foram 0,090; 0,125; 0,260; 0,335; 0,395; 0,455 e 0,475 mm respectivamente em 03 de dezembro de 2015 com Q=12,02 m<sup>3</sup>/s e Css=59,71 mg/L.

Os diâmetros máximos encontrados para D10, D16, D35, D50, D65, D84 e D90 foram 0,265; 0,300; 0,390; 0,485; 0,620; 0,865 e 0,925 respectivamente em 22 de outubro de 2015 para Q= 53,46 m<sup>3</sup>/s e Css= 183,96 mg/L.

Na tabela 12 são apresentados os resultados obtidos, para as frações granulométricas dos sedimentos do material de leito da seção transversal de Restinga Sêca.

Tabela 12 - Análise granulométrica as frações do material de leito

	Frações granulométricas	
	Areia(%)	Silte+ argila( %)
22/10/2014	95,13	4,87
06/11/2014	98,53	1,47
04/12/2014	93,06	6,94
23/12/2014	99,06	0,94
16/01/2015	99,11	0,89
04/03/2015	99,12	0,88
01/04/2015	93,71	6,29
29/05/2015	84,97	15,03
16/07/2015	83,64	16,36
22/07/2015	99,93	0,07
06/08/2015	99,91	0,09
03/12/2015	91,50	8,50
Máximo	99,93	16,36
Mínimo	83,64	0,07
Mediana	96,83	3,17
Média( $\mu$ )	94,81	5,19
Desvio Padrão ( $\sigma$ )	5,70	5,70
CV (%)	6,02	109,82

Na análise granulométrica do material de leito, constatou-se a predominância de areia (94,81 %).

Quando se comparam as análises granulométricas encontradas para material de leito e material de arraste de fundo nota-se que as proporções entre areia, silte e argila se assemelham.

De modo geral, verificou-se também que as maiores percentagens de silte + argila foram encontradas para as maiores descargas líquidas, tanto para o material do leito como também para o material de arraste.

Na tabela 13 são apresentados os resultados obtidos dos diâmetros característicos dos sedimentos em suspensão, das medições realizadas do monitoramento da seção do rio Vacacaí Mirim em estudo.

Tabela 13 - Diâmetros característicos das amostras de material em suspensão

Medição	Data	Q (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>ss</sub> (mg/L)	Diâmetro Característico (mm)						
				D10	D16	D35	D50	D65	D84	D90
1	02/10/201	54,13	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
2	22/10/201	53,46	183,96	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
3	06/11/201	46,14	181,43	-	0,004	0,007	0,011	0,022	0,255	0,515
4	04/12/201	10,33	54,16	-	0,005	0,008	0,013	0,023	0,350	0,550
5	23/12/201	44,02	99,34	-	-	0,006	0,008	0,011	0,018	0,025
6	16/01/201	39,86	49,52	-	-	0,007	0,009	0,013	0,100	0,127
7	04/03/201	8,68	32,69	-	-	0,007	0,008	0,010	0,018	0,022
8	01/04/201	33,13	53,04	-	0,045	0,008	0,011	0,017	0,245	0,450
9	29/05/201	49,96	69,93	-	0,005	0,008	0,012	0,020	0,128	0,505
10	16/07/201	45,23	21,02	0,004	0,006	0,012	0,030	0,276	0,395	0,450
11	22/07/201	82,31	18,17	0,004	0,006	0,012	0,032	0,285	0,385	0,435
12	06/08/201	29,34	78,71	-	0,048	0,008	0,013	0,022	0,385	1,000
13	25/09/201	51,66	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
14	14/10/201	52,82	15,63	-	0,005	0,009	0,015	0,068	0,185	0,250
15	06/11/201	20,29	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms	sms
16	03/12/201	12,02	59,71	-	0,0045	0,008	0,013	0,022	0,35	0,55
	Máximo	82,31	183,96	0,005	0,048	0,012	0,032	0,285	0,395	1,000
	Mínimo	8,68	15,63	0,005	0,004	0,006	0,008	0,010	0,018	0,022
	Mediana	44,63	54,16	0,005	0,005	0,008	0,012	0,022	0,250	0,450
	Média ( $\mu$ )	39,59	70,56	0,005	0,014	0,008	0,015	0,066	0,234	0,407
	Desvio	19,74	57,77	0,000	0,0191	0,001	0,008	0,101	0,142	0,272
	CV (%)	49,85	81,87	2,21	133,93	22,84	56,66	154,5	60,85	66,97

sms : sem medição de sedimento,

-: Diâmetros característicos obtidos foram inferiores/superior

Para os dias 16/07/2015 e 22/07/2015 foi possível observar todos os diâmetros característicos das amostras de material em suspensão.

Observou-se para seção do rio Vacacaí Mirim, Restinga Sêca os diâmetros característicos do material em suspensão D10, D16, D35, D50, D65, D84 e D90 com os diâmetros mínimos de 0,005; 0,004; 0,006; 0,008; 0,010; 0,018 e 0,022 mm.

Os diâmetros máximos encontrados para D10, D16, D35, D50, D65, D84 e D90 foram 0,005; 0,048; 0,012; 0,032; 0,285; 0,395 e 1,000 respectivamente.

Na tabela 14 são apresentados os resultados obtidos dos diâmetros característicos dos sedimentos em suspensão da seção do rio Vacacaí Mirim.

Tabela 14 – Análise granulométrica do sedimento em suspensão

	Frações granulométricas		
	Areia (%)	Silte( %)	Argila (%)
06/11/2014	28,1	57,8	14,1
04/12/2014	31,5	55,1	13,4
23/12/2014	6,2	75,4	18,4
16/01/2015	18,7	65,1	16,2
04/03/2015	4,9	76,5	18,6
01/04/2015	24,4	61,8	13,8
29/05/2015	28,7	58,5	12,8
16/07/2015	48,5	43,1	8,4
22/07/2015	49,3	42,5	8,2
06/08/2015	30,9	56,5	12,6
14/10/2015	36,4	52,2	11,4
03/12/2015	32,9	54,4	12,7
Máximo	49,3	76,49118	18,60882
Mínimo	4,9	42,47369	8,226306
Mediana	29,8	57,15057	13,07693
Média( $\mu$ )	28,375	58,25133	13,37367
Desvio Padrão ( $\sigma$ )	13,80475	10,56514	3,28193
CV (%)	48,6511	18,13717	24,54023

A análise granulométrica do sedimento em suspensão constatou a predominância de silte (58,3%), areia (28,4 %) e argila (13,4 %). Observou-se quase que total predominância da fração silte seguido pela fração argila e um menor percentual de areia nos dias 23 de dezembro de 2014 (com 75,4 % de silte, 18,4 % de argila e 6,2 % de areia) e no dia 4 de março de 2015 76,5 % de silte, 18,6 % de argila e 4,9 % de areia.

Em dois dias avaliados ocorreram alterações nas frações granulométricas com a predominância da fração areia. No dia 16 de julho de 2015 as frações granulométricas foram 48,5 % de areia, 43,1 % de silte e 8,4 % de argila e no dia 22 de julho de 2015 foram 49,3 % de areia, 42,5 de silte e 8,2 % de argila.

### 5.3 Curva-Chave

#### 5.3.1 Curva chave da descarga líquida obtida no período de 2014/2015

A curva chave, ilustrada na figura 21, foi calibrada a partir de 16 medições realizadas em campo entre 2 de outubro de 2014 e 03 de dezembro de 2015. A equação da curva-chave é válida para cotas maiores ou iguais a 2,46 m e inferiores a 6,84 m e pode ser expressa pela equação 117.

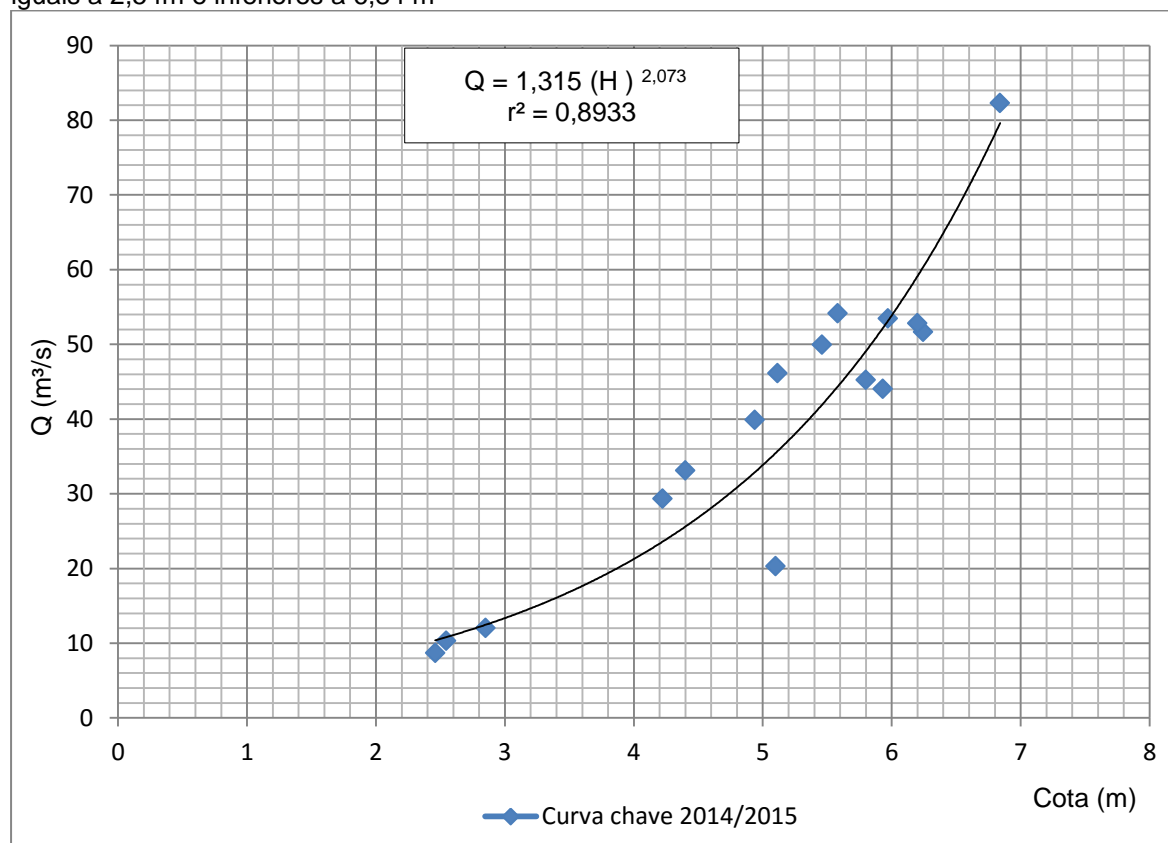
$$Q = 1,315 (H)^{2,073}, \text{ com } r^2 = 0,8933 \quad (117)$$

Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

H= cota (m)

Figura 21 - Curva-chave da seção Vacacai Mirim Restinga Sêca válida para cotas maiores ou iguais a 2,54m e inferiores a 6,84 m



A curva chave observada para o período avaliado obteve uma correlação positiva muito forte entre as cotas e vazões observadas, com coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,893 indicando que 89,33% da variação da cota pode ser explicado pela variação da vazão ou vice versa e que 10,67% é explicado por outras variáveis que podem interferir, tal como a cobertura do solo durante o ano., contribuindo para uma maior proteção do solo contra impacto de gotas de chuva, exploração pelo sistema radicular permitindo uma maior ou menor infiltração de água e redução ou aumento do escoamento superficial

Destaca-se que em 4/12/2014 assim como em 03/12/2015 as vazões se assemelham 10,33 m<sup>3</sup>/s e 12,02 m<sup>3</sup>/s respectivamente e esses valores podem

justificar-se pelo bombeamento de água para a irrigação das lavouras de arroz independente da precipitação, pois nos dois anos as chuvas ocorridas no mês foram superiores a média mensal uma vez que as cotas se mantiveram próximas para 2,55 m em 04/12/2014 e 2,84 m no dia 03/12/2015.

### 5.3.2 Curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão, obtida no período de 2014/2015

A curva chave para descarga de sedimentos em suspensão, é ilustrada na figura 22, foi calibrada a partir de 13 medições realizadas em campo entre 22 de outubro de 2014 e 03 de dezembro de 2015. A equação da curva-chave é válida para descarga de sedimentos em suspensão variando de 24,51 ton/dia  $\leq$   $Q_{ss} \leq$  849,73 ton/dia e pode ser expressa pela equação 118.

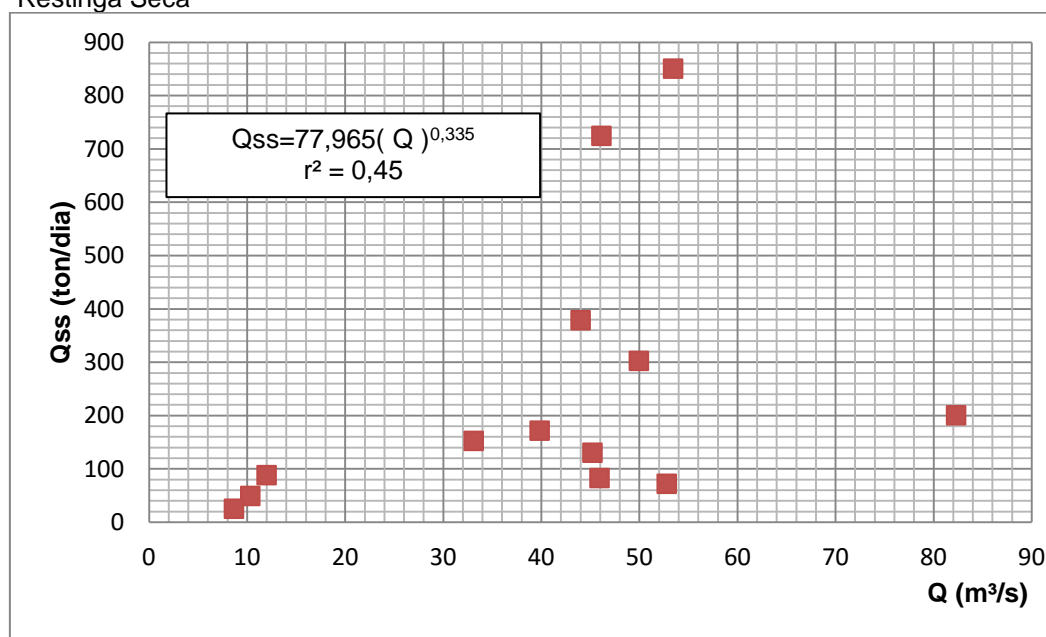
$$Q_{ss}=77,965( Q )^{0,335}, \text{ com } r^2 = 0,45 \quad (118)$$

Onde:

$Q_{ss}$  = descarga sólida em suspensão (ton/dia);

$Q$ = vazão ( $m^3/s$ )

Figura 22 - Curva-chave da descarga sólida em suspensão ( $Q_{ss}$ ) da seção Vacacai Mirim Restinga Sêca





A curva chave observada para o período avaliado obteve uma correlação positiva moderada ( $r=0,67$ ) entre as descargas sólidas em suspensão e as vazões observadas. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi de 0,45, indicando que 45 % da variação da descarga sólida em suspensão pode ser explicada pela variação da vazão ou vice versa. No entanto 55% são explicados por outras variáveis que podem interferir, tais como, umidade antecedente do solo, cobertura do solo e práticas conservacionistas (cobertura do solo com restos culturais, plantio direto).

Nos eventos em 22 de outubro de 2014 (849,73 ton/dia) e 06 de novembro de 2014 (723,25 ton/dia), as descargas de sedimento em suspensão podem ser explicadas pelos mesmos motivos da concentração de sedimentos em suspensão, ou seja, grandes volumes de chuva associados (114,6 mm de 17/10/2014 a 20/10/2014 e 91,3 mm de 30/10/2014 a 04/11/2014) ao início do período de plantio e pós-emergência do arroz. Estas áreas já estão com a lâmina d'água, porém, o solo está sem cobertura de plantas ou as mesmas estão pequenas deixando o solo desprotegido e propiciando maior carreamento de solo em eventos de grandes volumes de precipitação como foram os eventos monitorados.

As menores descargas sólidas em suspensão foram encontradas em 04 de dezembro de 2014 (48,36 ton/dia) e 04 de março de 2015 com (24,51 ton/dia) mesmo apresentando descargas líquidas próximas a 10,33 m<sup>3</sup>/s e 8,68 m<sup>3</sup>/s, respectivamente apresentaram valores de Q<sub>ss</sub> distintos pois a C<sub>ss</sub> do evento de 04 de dezembro de 2014 (54,16 mg/L), foi maior que do evento do dia 04 de março de 2015 (32,69 mg/L)

Para o evento de 04/12/2014, o período avaliado de chuvas foram entre 30/11/2014 e 03/12/2014 com total acumulado de 63,3 mm. A Q<sub>ss</sub> é justificada pelo maior volume de chuva, que nesta época do ano se caracteriza por grandes volumes em um curto intervalo de tempo e bombeamento de água do rio para manutenção da lamina d' água das lavouras de arroz.

Nos meses de fevereiro e março de 2015 os volumes precipitados foram inferiores a média do mês. Para o evento em 04/03/2015, a precipitação acumulada entre 26 de fevereiro de 2015 e 04 de março de 2015 foi de 15,8 mm, podendo justificar a Q<sub>ss</sub> baixa em relação aos demais eventos.

Em 6 de julho de 2015 a descarga sólida em suspensão foi igual a 200,07 ton/dia, sendo que a precipitação ocorrida no mês foi superior a média histórica do mês. A precipitação considerada foi de 04/08/2015 a 05/08/2015, com volume de chuva de 37,8 mm resultando numa vazão de 82,31 m<sup>3</sup>/s.

### 5.3.3 Curva-chave da descarga de sedimentos total, obtida no período de 2014/2015

A curva chave para descarga total de sedimentos, ilustrada na figura 23, foi calibrada a partir de 13 medições realizadas em campo entre 22 de outubro de 2014 e 03 de dezembro de 2015. A equação da curva-chave é válida para descargas de sedimentos totais maiores ou iguais a 24,89 ton/dia e inferiores a 850,41 ton/dia e pode ser expressa pela equação 121.

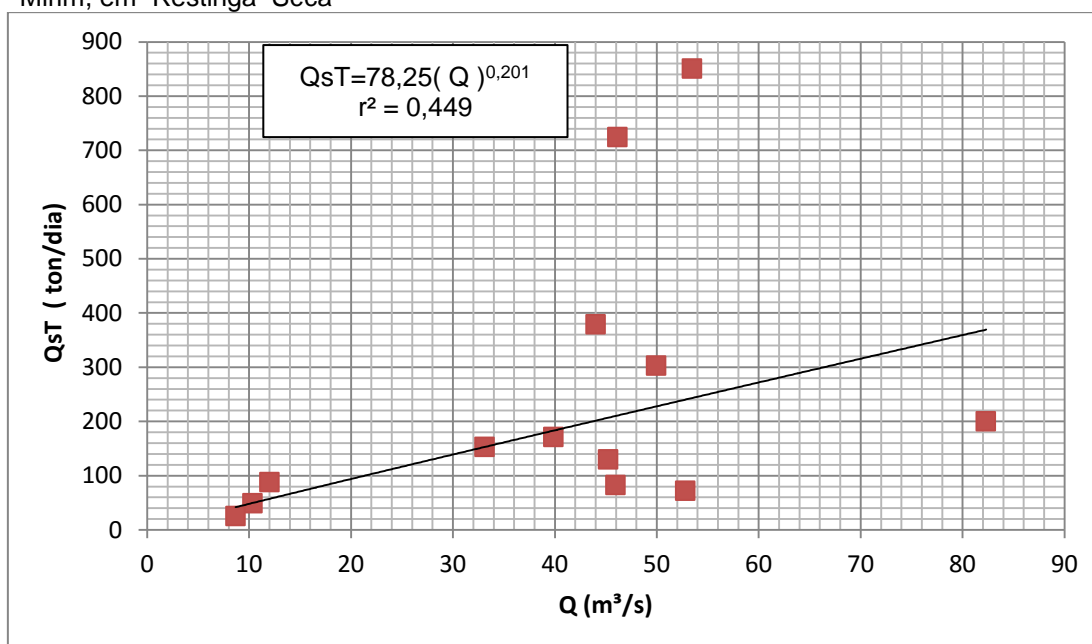
$$Q_{sT} = 78,25 (Q)^{0,201}, \text{ com } r^2 = 0,449 \quad (121)$$

Onde:

$Q_{sT}$  = Descarga sólida total (ton/dia);

$Q$  = Vazão (m<sup>3</sup>/s)

Figura 23 - Curva-chave da descarga de sedimentos total ( $Q_{sT}$ ) da seção do Rio Vacacai Mirim, em Restinga Sêca



A curva chave observada para o período avaliado obteve uma correlação positiva moderada ( $r = 0,67$ ) entre as descargas sólidas totais e vazões observadas e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,449 onde 44,9% da variação da descarga sólida total pode ser explicado pela variação da vazão ou vice versa.

As maiores QsT foram obtidas de 22 de outubro de 2014 (850,40 ton/dia) e 06 de novembro de 2014 (723,92 ton/dia). Estas descargas sofrem influência da época do ano, marcada por índices pluviométricos superiores à média histórica do mês.

Para o mês de dezembro de 2014 a precipitação ocorrida foi acima da média histórica do mês. No evento de 4/12/2014, a precipitação acumulada foi dos dias 30/11/14 a 03/12/2014 com 63,3 mm em que a QsT (48,75 ton/dia) é justificada pelo maior volume de chuva, que nesta época do ano se caracterizam por grandes volumes em um curto intervalo de tempo e bombeamento de água do rio para manutenção da lamina d' água das lavouras de arroz.

Para os meses de fevereiro e março de 2015 os volumes precipitados foram inferiores a média do mês. Em 04 de março de 2015 a precipitação foi de 15,8 mm, correspondendo ao período de 28/02/2015 a 04/03/2015, resultando em uma baixa descarga líquida e uma QsT baixa, em relação aos demais eventos.

No dia 03 de dezembro de 2015 obteve-se uma descarga de sedimentos total de 87,905 ton/dia para uma vazão de 12,02 m<sup>3</sup>/s que se comparado com o dia 16 de junho de 2015 onde a QsT foi de 82,610 ton/dia e vazão de 45,96 m<sup>3</sup>/s, observa-se que mesmo apresentando valores semelhantes de QsT apresentam descargas líquidas diferentes, isso pode ser atribuído ao efeito de diferentes índices pluviométricos onde a precipitação ocorrida em dezembro de 2015 é superior a média mensal histórica. No entanto ocorre o bombeamento de água do rio para a manutenção da lâmina da água na lavoura de arroz. Isso leva a uma redução na descarga líquida..A precipitação ocorrida em junho de 2015 é inferior a média mensal histórica mesmo apresentando descarga líquida maior que em 03/12/2015 esta é influenciada pelo tipo de chuvas que ocorrem na área de estudo nesta época do ano, que apresentam características de longa duração, baixo volume e intensidade.

#### 5.4 Concentração de sedimentos em suspensão, obtida no período de 2014/2015

As concentrações de sedimentos em suspensão, ilustrada na tabela 15 obtidas a partir de 13 medições realizadas em campo entre 22 de outubro de 2014 e 03 de 12 de 2015. Obteve-se concentrações de sedimentos que variaram de 15,63 mg/L a 183,96 mg/L.

Tabela 15- Concentração de sedimentos em suspensão (Css)

Data	Q(m <sup>3</sup> /s)	Css(mg/L)
22/10/2014	53,46	183,96
06/11/2014	46,14	181,43
04/12/2014	10,34	54,16
23/12/2014	44,02	99,34
16/01/2015	39,86	49,52
04/03/2015	8,68	32,69
01/04/2015	33,13	53,04
29/05/2015	49,96	69,93
16/07/2015	45,96	21,02
22/07/2015	45,23	18,17
06/08/2015	82,31	78,71
14/10/2015	52,82	15,63
03/12/2015	12,02	59,71
Mínimo	8,68	15,63
Máximo	82,31	183,96
Mediana	45,23	54,16
Média ( $\mu$ )	40,30	70,56
Desvio Padrão( $\sigma$ )	20,50	55,40
CV(%)	50,86	78,52

Nota: Q= vazão (m<sup>3</sup>/s); Css= Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)

A variação da concentração de sedimentos em suspensão pode ser explicada por outras variáveis que podem interferir, tais como índices pluviométricos, uso e tipo de solo, intensidade, volume e duração de chuvas.

O cultivo de arroz é realizado com a inundação da área de plantio, o que em eventos extremos de chuva ocasionam o extravasamento d' água sobre as taipas e facilitando o carreamento de solo, levando a maiores valores de concentração de sedimentos em suspensão. Esta situação pode ser observada no dia 22 de outubro de 2014, quando a precipitação para o mês de outubro superou a média mensal resultando na máxima Css observada.

Neste período ocorre o início do plantio e pós-emergência do arroz, quando as áreas cultivadas já estão alagadas. Porém, o solo está sem cobertura de plantas ou estas estão pequenas, deixando o solo desprotegido e propiciando maior carreamento de solo, o que pode ser evidenciado pela Css de 183,96 mg/L e Q de 53,46 m<sup>3</sup>/s ocorrida em 22/10/2014.

A precipitação acumulada entre 30 de outubro de 2014 e 05 de novembro de 2014 foi igual a 91,33mm, associado ao período de preparo e plantio do arroz deixando o solo mais suscetível a erosão podendo explicar o elevado valor da Css (181,43 mg/L).

No evento de 22/07/2015 a precipitação acumulada foi de 122,8 mm, ocorrida entre 16 de julho e 21 de julho de 2015 resultando em uma Css de 18,173 mg/L e Q 45,23 m<sup>3</sup>/s.

Os eventos de 16 de julho e 22 de julho de 2015 apresentaram as menores concentrações de sedimentos em suspensão e, que podem ser explicadas pela adoção de cultivos de inverno (pastagens), com integração de lavoura e pecuária, que favorecem a proteção do solo por meio do aumento da cobertura do mesmo, proporcionando a redução da geração e transporte de sedimentos.

No evento em 14/10/2015 obteve-se a menor Css, (Css=15,627 mg/L). para o período de 2014 e 2015. A precipitação ocorrida no mês de outubro foi superior a média mensal da serie histórica da FEPAGRO (1971-2000) e 8º DISME (1961-2000). A precipitação entre os dias 06 de outubro e 14 de outubro de 2015 foi 295,4 mm. A Css pode ser explicada pelo período antecedente às precipitações, ocorreram 11 dias sem chuva favorecendo a redução da umidade do solo, que na ocorrência da precipitação grande parte desta infiltra no solo até atingir a capacidade de campo, com posterior escoamento superficial e transporte de sedimentos.

Conforme Depiné et al. (2011) a intensidade da chuva, a carga de sedimento disponível para transporte e as contribuições externas influenciam a concentração de sedimentos de acordo com a ascensão do nível da água..

## 5.5 Descarga sólida total mensal

### 5.5.1 Descarga sólida total mensal do período de outubro de 2014 a dezembro de 2015

Na tabela 16 são apresentadas as descargas sólidas totais mensais pós secagem da amostra em estufa e pós queima da amostra na mufla, para o período de outubro de 2014 a dezembro de 2015 para a seção do rio Vacacaí Mirim.

Tabela 16 – Descarga sólida mensal outubro 2014 a dezembro de 2015

Mês/ano	QsT (ton) pós estufa	%	QsT (ton) pós mufla	%	Dif entre Qsts
out/14	1.284.299,52	8,06	1122,96	0,96	1.283.176,57
nov/14	1.063.981,58	6,67	8457,01	7,19	1.055.524,57
dez/14	992.591,61	6,23	8452,73	7,19	984.138,88
jan/15	828.892,20	5,20	8063,39	6,86	820.828,81
fev/15	595.404,21	3,73	7013,41	5,97	588.390,80
mar/15	529.279,79	3,32	7109,86	6,05	522.169,93
abr/15	280.797,17	1,76	5738,22	4,88	275.058,95
mai/15	283.696,07	1,78	5811,58	4,94	277.884,49
jun/15	1.101.731,67	6,91	8472,58	7,21	1.093.259,10
jul/15	1.874.547,53	11,76	9887,52	8,41	1.864.660,01
ago/15	2.085.092,36	13,08	10140,15	8,63	2.074.952,21
set/15	1.914.955,56	12,01	9756,77	8,30	1.905.198,79
out/15	1.641.290,32	10,29	9577,26	8,15	1.631.713,06
nov/15	1.306.765,82	8,20	8900,86	7,57	1.297.864,96
dez/15	159.344,26	1,00	9050,34	7,70	150.293,92
<b>Total</b>	<b>15.942.669,67</b>		<b>117.554,62</b>		

Os valores para a descarga sólida total para o período de 15 meses na seção transversal avaliada foi de 15.942.669,67 toneladas ou 17.423,68 ton/ha/ano (pós secagem em estufa) e de 117.554,62 toneladas ou 128,47 ton/ha/ano (pós queima da matéria orgânica na mufla). Esses valores correspondem a um equivalente de perda de solo no período de 15 meses de 6,97 mm (pós estufa) e de 0,05 mm (pós mufla), onde considerou-se peso específico do sedimento igual a 2,5 ton/m<sup>3</sup>.

Didoné, 2013, encontrou como resultado para a produção de sedimentos no ano de 2011 na bacia do rio Conceição o valor de 171 ton/ha/ano. No ano de

2012 o valor foi significativamente menor, na ordem de 41 ton/ha/ano. Isso demonstra o forte controle dos eventos extremos sobre os processos erosivos e a consequente necessidade de estruturas de contenção da erosão. Para o período de 2014 e 2015 encontrou-se descarga sólida mensal inferiores aos encontrados pelo autor no ano de 2011 e superiores aos encontrados em 2012

A menor Qst pos estufa foi 159.344,26 ton obtida no mês de dezembro de 2015. A menor QsT pós estufa, que pode ser explicado pelas chuvas ocorridas serem superiores as médias do mês.

A menor Qst pos mufla foi de 1122,96 ton, obtida no mês de outubro de 2014. Esse baixo valor para a Qst pode ser explicado pelo mês de outubro de 2014 apresentar chuvas superiores a média histórica do mês.

O mês de agosto de 2015 apresentou a maior QsT mensal pós estufa de 2.085.092,36 ton e QsT pós mufla de 10.140,15 ton. Neste mês também encontrou-se a maior diferença entre as descargas sólidas totais (2.074.952,21 ton), indicando grande quantidade de materiais orgânicos, tais como, restos culturais, galhos e folhas de árvores que atingiram o leito do rio e foram transportados juntamente com os sedimentos.

## **5.6 - Descarga sólida medida em suspensão e de fundo**

A tabela 16 apresenta a descarga sólida em suspensão (Qss) e a descarga sólida de fundo (Qsf) medidas, com as percentagens das mesmas para seção transversal do rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca.

Tabela 17 -Descarga sólida medida em suspensão e de fundo

Data	Q (m³/s)	Css (mg/L)	Qss (ton/dia)	Qsf (ton/dia)	Qss(%)	Qst (ton/dia)
22/10/2014	53,46	183,96	849,73	0,77	99,91	850,50
06/11/2014	46,14	181,43	723,25	0,11	99,99	723,36
04/12/2014	10,33	54,16	48,36	0,01	99,99	48,37
23/12/2014	44,02	99,34	377,84	0,25	99,93	378,09
16/01/2015	39,86	49,52	170,55	0,45	99,73	171,01
04/03/2015	8,68	32,69	24,51	0,00	99,99	24,51
01/04/2015	33,13	53,04	151,81	0,21	99,86	152,03
29/05/2015	49,96	69,93	301,90	1,15	99,62	303,04
16/07/2015	45,23	21,02	82,13	0,05	99,93	82,18
22/07/2015	82,31	18,17	129,24	0,16	99,88	129,40
06/08/2015	29,34	78,71	199,52	0,10	99,95	199,63
14/10/2015	52,82	15,63	71,32	0,07	99,91	71,38
03/12/2015	12,02	59,71	61,98		100,00	61,98
Máximo	82,31	183,96	849,73	1,15	100,00	850,50
Mínimo	8,68	15,63	24,51	0,00	99,62	24,51
Média	39,02	70,56	245,55	0,28	99,90	245,81
Desvio Padrão	20,63	55,40	261,80	0,35	0,11	261,96
CV (%)	52,87	78,52	106,62	126,20	0,11	106,57

Qss - descarga sólida em suspensão; Qsf - descarga sólida de fundo; Qst -- descarga sólida total; Css - Concentração de sedimentos em suspensão;

A descarga sólida total em suspensão foi a predominante em relação a descarga sólida total representando 99,90 % do total de sedimentos transportados coletados na avaliação do período de 2014 a 2015.

Rizzardi (2013) em seu estudo na seção do rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca, constatou que a Qss e a Qsf medidas aumentaram as percentagens das mesmas com o incremento da vazão. A descarga sólida em suspensão correspondeu 99,87% do transporte de sedimentos na seção estudada coincidindo com os valores encontrados com no atual estudo..

## 5.7 Avaliação temporal

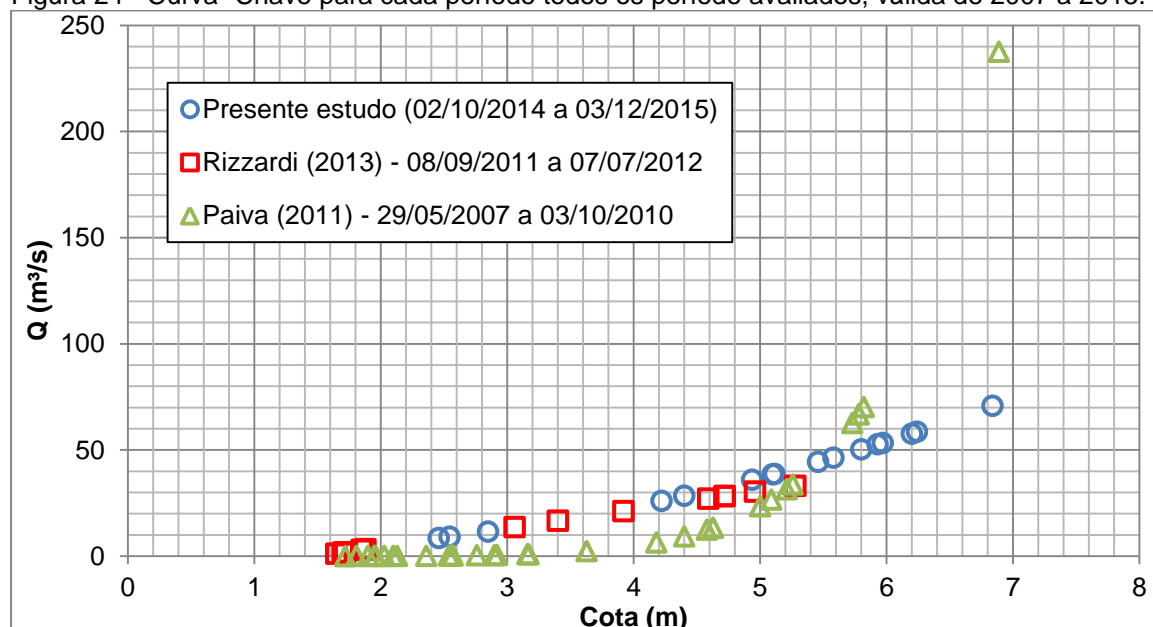
### 5.7.1 Curva-Chave da descarga líquida para cada período

Para a avaliação temporal os resultados obtidos no atual estudo (2014/2015), juntamente com as medições do relatório final do Edital MCT/CNPq



15/2007-Universal (2007/2010) e por Rizzardi (2013) (2011/2012) foram inseridos em uma curva-chave para cada período, ilustrada na figura 24, onde pode observar-se o comportamento destas curvas-chaves.

Figura 24 - Curva- Chave para cada período todos os período avaliados, válida de 2007 a 2015.



Observou-se que para as medições realizadas no período de 2014/2015 a cota mínima foi de 2,46 m e a máxima de 6,84. Para o período de 2011/2012 as cotas mínimas e máximas observadas foram de 1,65 m e 5,28 m. No período de 2007/2010 a cota mínima observada foi de 1,72 m e a cota máxima de 6,89 m.

Em relação às vazões, observa-se que as mínimas foram de 8,68 m³/s, 1,42 m³/s e 1,85 m³/s para 2014/2015, 2011/2012 e 2007/2010, respectivamente e as máximas foram 82,31 m³/s, 33,26 m³/s e 247,17 m³/s. Observou-se que as curvas chaves apresentaram a mesma tendência quanto ao comportamento de crescimento de cota com o aumento da vazão em 2011/2012 e 2014/2015 diferenciando-se do período de 2007/2010. Pode-se afirmar que se ocorreram alterações do leito ou margens dos rios estas não interferiram no comportamento da curvas chaves para os períodos de 2011/2012 e 2014/2015.

## 5.7 2 Curva-Chave única da descarga líquida período de 2007 a 2015.

Para uma melhor visualização da variação temporal dos resultados obtidos no atual estudo (2014/2015), juntamente com as medições do relatório final do Edital MCT/CNPq 15/2007-Universal (2007/2010) e por Rizzardi (2013) (2011/2012) foram inseridos em uma curva-chave única para o período de 2007 a 2015 , ilustrada na figura 25.

A equação da curva-chave é válida para cotas maiores ou iguais a 1,65 m e inferiores a 6,89 m, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 120.

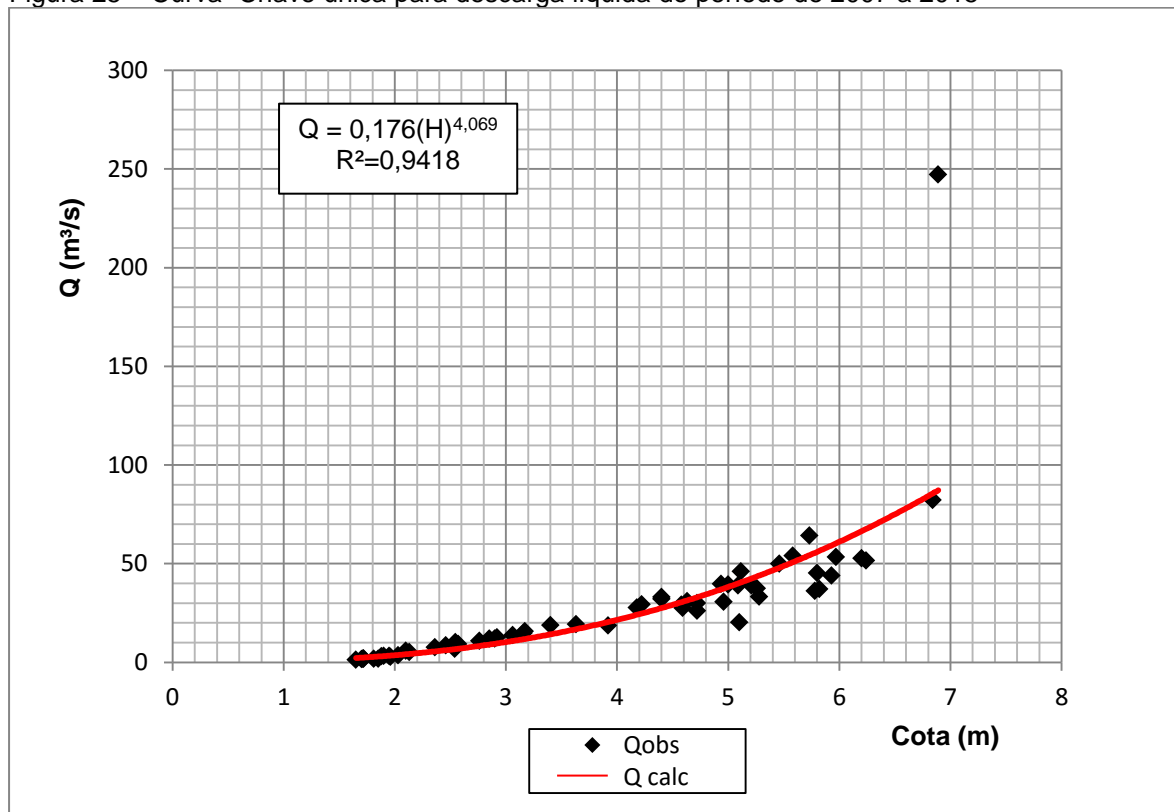
$$Q = 0,176(H)^{4,069}, \text{ com } r^2=0,9418 \quad (120)$$

Onde:

Q= vazão em (m<sup>3</sup>/s);

H= cota em (m)

Figura 25 – Curva- Chave única para descarga líquida do período de 2007 a 2015



Observou-se que para as medições realizadas no período de 2007 a 2015 cota mínima foi de 1,65 m e a máxima de 6,89 m. Para o período a vazão variou de 1,42 m³/s a 247,17 m³/s sendo respectivamente estas as mínimas e máximas observadas para todo período.

A correlação apresentada foi de  $r=0,97$  sendo considerada uma correlação positiva muito forte entre as variáveis cota e vazão. O coeficiente de determinação foi de  $r^2=0,9418$ , isto significa que 94,18% da variação da descarga líquida pode ser explicada pela variação cota.

A menor descarga líquida foi encontrada em 15 de maio de 2012, onde a Q é de 1,42 m³/s para cota de 1,65 m que pode ser explicada um pequeno volume precipitado (13,8 mm) em 12 de maio de 2012

A maior descarga líquida foi obtida em 25 de setembro de 2007, onde a descarga líquida foi 247,17 m³/s e cota de 6,89 m, que podem ser explicados pelo volume precipitado de 206,3 mm entre 15 de setembro de 2007 e 24 de setembro de 2007 além deste evento o rio ter extravasado da calha do rio.

Didoné (2013) em seu estudo apresentou a série de dados médios diários da descarga líquida entre março de 2011 e dezembro de 2012. Observou a

existência de eventos considerados de alta magnitude, diferentemente do número de picos encontrados ao avaliar a escala mensal. obtendo em um evento um pico de 230 m<sup>3</sup>/s em 22/06/2011 e o período de julho a agosto de 2011 foi caracterizado pela ocorrência de grandes eventos hidrológicos, apresentando o maior valor médio máximo mensal registrado 210,40 m<sup>3</sup>/s.

Para a seção do rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca, os resultados de vazões encontrados no período de 2007 a 2015 se assemelharam quanto a ocorrência de alta magnitude em alguns eventos como o 25 de setembro de 2007, onde a descarga líquida foi de 247,17 m<sup>3</sup>/s .

A mínima e a máxima descarga líquida ocorreram no período de abril a setembro que compreende o período sem o cultivo de arroz indicando que a variação da cota e vazão são mais influenciadas pela ocorrência de grandes volumes de chuva, do que pela retirada de água do rio.

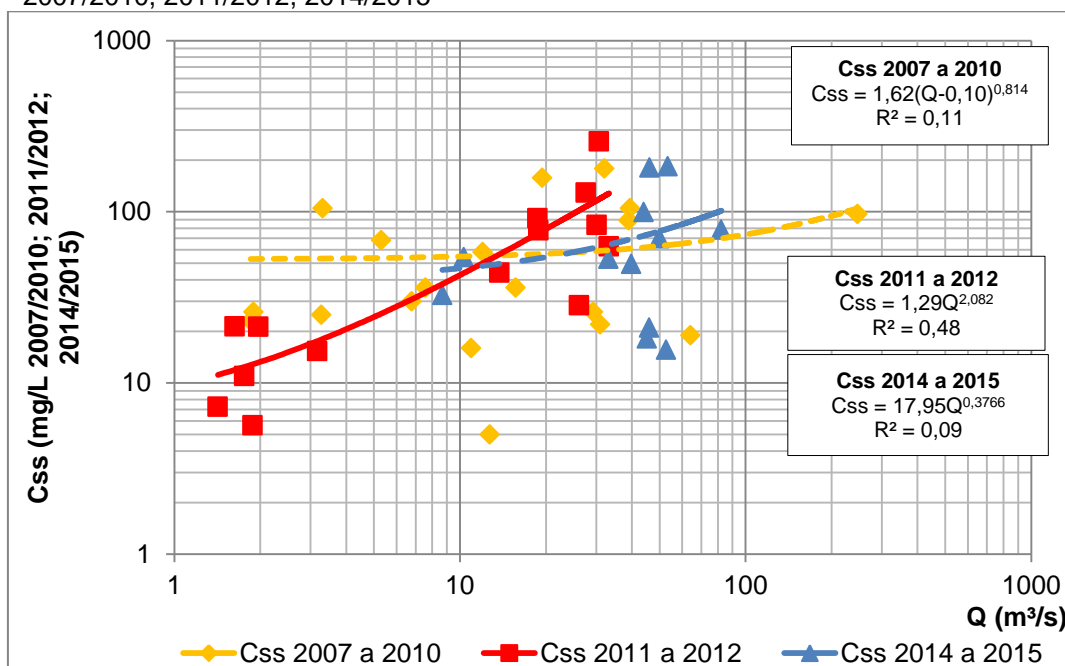
## **5.8 Curva-chave da descarga de sedimentos**

### **5.8.1 Concentração de sedimentos em suspensão para períodos distintos**

Na figura 26 são apresentadas as concentrações de sedimentos em suspensão na seção Vacacaí Mirim – Restinga Sêca para os períodos avaliados individualmente.

Pode ser observado que quando comparamos os períodos observados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS), no ano de 2007 a 2010 e 2014 a 2015, estes tem o mesmo comportamento quanto a tendência de aumento de CSS em relação à vazão observada. Diferenciando-se no ano de 2007 e 2008, com precipitações anuais médias inferiores a média histórica e para 2009 e 2010 apresentando precipitações anuais superiores as médias históricas. Nos anos de 2014 a 2015 apresentaram precipitações anuais superiores as médias históricas que pode explicar maiores os valores de C<sub>ss</sub> em relação ao período de 2007 a 2010.

Figura 26 – Curva – Chave da concentração de sedimentos em suspensão para os períodos 2007/2010, 2011/2012, 2014/2015



O período de 2011 a 2012 apresentou comportamento da C<sub>ss</sub> diferente dos outros dois períodos avaliados, as precipitações anuais foram inferiores as médias anuais da série histórica. O aumento da concentração de sedimentos em suspensão foi mais expressivo, provavelmente devido a ocorrência de longos períodos de estiagem e posteriormente a ocorrência de precipitações intensas, o que provoca o desenvolvimento do processo erosivo.

Observou-se a C<sub>ss</sub> para o período de 2007/2010 o valor mínimo obtido foi 5 mg/L e valor máximo de 179 mg/L. A média foi 59,10 mg/L e a mediana 36 mg/L. A C<sub>ss</sub> no período de 2011/2012 apresentou valor mínimo 5,66 mg/L e máximo de 257,38 mg/L. A média obtida foi igual a 61,26 mg/L e a mediana 36,21 mg/L. No período de 2014/2015 a C<sub>ss</sub> mínima foi de 15,63 mg/L e a máxima de 183,96 mg/L, obteve-se média foi 70,56 mg/L e mediana de 54,16 mg/L.

### 5.8.2 Curva-chave da concentração de sedimentos em suspensão em um único período

A figura 27 ilustra a curva-chave única da concentração de sedimentos em suspensão na seção do rio Vacacai Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015. A equação da curva-chave é válida para concentrações de sedimento em suspensão maiores ou iguais a 5,00 mg/L e inferiores a 257,38 mg/L, pode ser expressa pela equação 121.

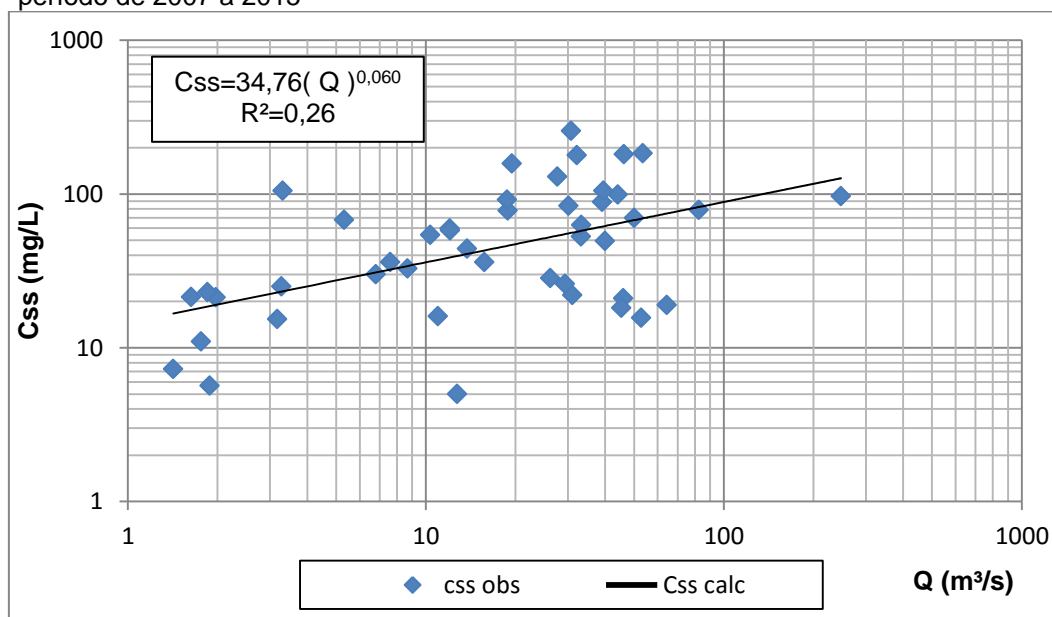
$$C_{ss}=34,76( Q )^{0,060}, \text{ com } r^2=0,26 \quad (121)$$

Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

C<sub>ss</sub>= Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)

Figura 27 - Curva – Chave única da concentração de sedimentos em suspensão para o período de 2007 a 2015



Quando plota-se uma única curva com os valores do período de 2007 a 2015 observou-se que para as medições realizadas para sedimentos em suspensão no obteve-se a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) mínima de 5,00 mg/L em 17/07/2007 e a máxima de 257,38 mg/L em 01/06/2012.

A menor concentração de sedimentos em suspensão foi encontrada em 17 de julho de 2007, onde a C<sub>ss</sub> foi 5 mg/L para uma descarga líquida de 12,73 m<sup>3</sup>/s, pois o mês de julho de 2007 apresentou a ocorrência de precipitações ocorridas inferiores a média do mês e os dias que antecederam a coleta não apresentaram precipitações significativas.

A maior concentração de sedimentos em suspensão foi encontrada em 01 de junho de 2012, onde a C<sub>ss</sub> foi 257,38 mg/L, para uma descarga líquida de 30,67 m<sup>3</sup>/s, que pode ser justificada por dias que antecederam a coleta sem precipitações e em 30 de maio de 2012 registrou-se uma precipitação de 124mm que pode explicar a maior C<sub>ss</sub>.

As menores C<sub>ss</sub> observadas apresentam-se, ao longo do monitoramento, nos meses de maio e junho. Destaca-se que o comportamento da C<sub>ss</sub> segue, analogamente, o comportamento da descarga líquida ao longo do monitoramento, ou seja, a elevação da C<sub>ss</sub> tem relação direta com a vazão.

Andrade Neto (2011) em estudo avaliando a média da concentração de sedimentos em suspensão do rio Guaíba nos anos amostrados (2003 a 2006), obteve a média de 35 mg/L e a maior C<sub>ss</sub> de 150 mg/L em 11 de julho de 2003 com vazão média de 2763 m<sup>3</sup>/s.

A correlação apresentada foi de  $r = 0,51$  sendo considerada uma correlação positiva moderada entre as variáveis avaliadas. O coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,26$ , isto significa que 26% da variação da concentração de sedimentos em suspensão é explicada pela variação da vazão.

Leli et al. (2011) encontrou valor de  $r^2 = 0,56$  onde considerou relativamente baixo devido ao efeito da histerese e grande variação das vazões. A C<sub>ss</sub> para o período de 2007 a 2015 apresentou  $r^2 = 0,26$  que pode ser uma das causas para utilizar como uma das explicações para o  $r^2$  tão baixo, o efeito da histerese apresentado pelo autor.

Leli et al. (2011) afirma que a relação entre a concentração de sedimento suspenso e a vazão líquida não apresenta uma correlação muito boa, principalmente nas descargas maiores. O efeito de histerese, apesar de difícil caracterização, pode ser constatado e evidencia que as maiores descargas de sólido suspenso ocorrem no período de ascensão do pico de cheia. A dificuldade

de caracterização da histerese deve-se à ausência de dados contínuos durante os eventos de cheia.

Andrade Neto (2011) obteve na avaliação temporal de 4 anos (2003 a 2006) no sistema Guaíba, RS onde a associação da descarga fluvial e a contribuição de sedimentos em suspensão apresentou um coeficiente  $r^2=0,6781$ , considerando significativa, uma vez que 67 % da variação da concentração de sedimentos em suspensão é explicada pela vazão

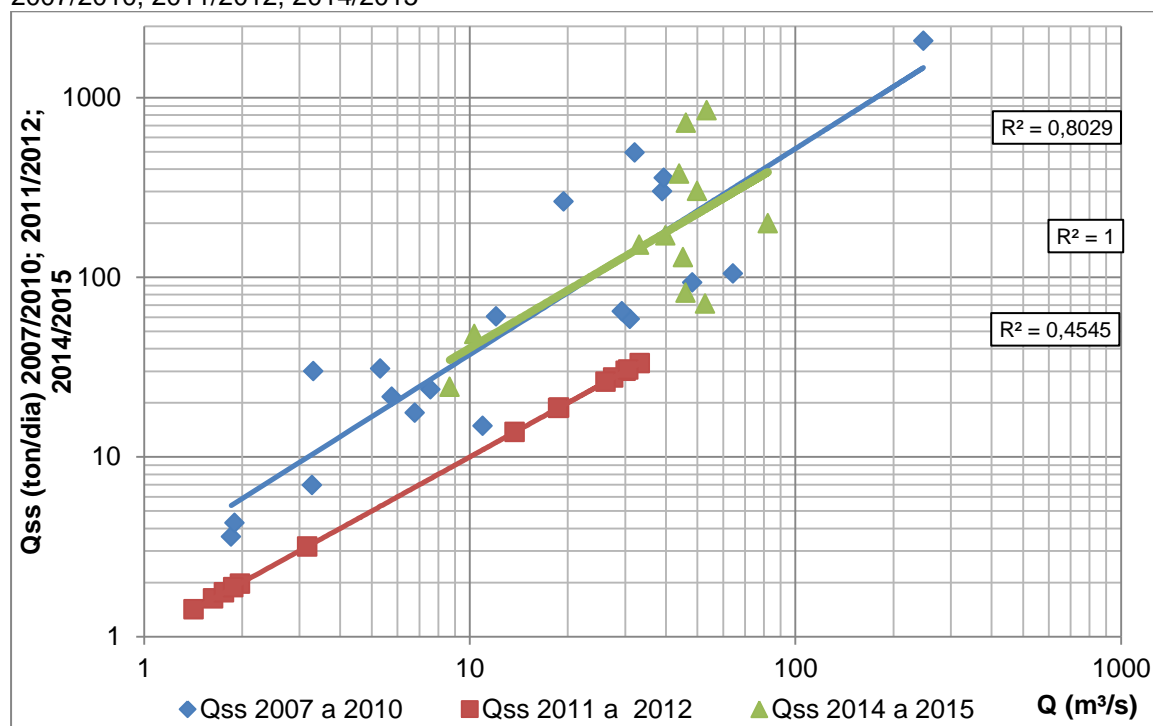
No entanto, a máxima anual  $C_{ss}$  e  $Q$  não coincidem. Isto indica que as maiores cargas anuais são provavelmente causado por uma combinação de diferentes eventos que ocorrem ao longo do ano (DIDONÉ, 2013). Isto é evidenciado no atual estudo e na variação temporal de 2007 a 2015 indicando que a curva chave para concentração de sedimentos em suspensão deve ser utilizada com cautela.

### 5.8.3 Curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão em períodos separados

A figura 28 ilustra a descarga de sedimentos em suspensão na seção Vacacai Mirim – Restinga Sêca para os períodos avaliados separadamente.



Figura 28 - Curva – Chave da descarga de sedimentos em suspensão para os períodos 2007/2010, 2011/2012, 2014/2015



As curvas de descarga sólida em suspensão dos períodos de 2007 a 2010 e 2014 a 2015 apresentaram comportamento de crescimento semelhantes, diferenciando-se de 2011 a 2012.

No ano de 2007 e 2008 as precipitações anuais ficaram abaixo das médias anuais com algumas chuvas com maiores volumes que provocaram alguns valores maiores Qss. Nos anos de 2009 e 2010 as precipitações anuais foram superiores as médias e levaram ao aumento dos valores na curva chave do período.

No período de 2007/2010 obteve-se a descarga mínima de Qss de 3,60 ton/dia e máxima de 2071,51 ton/dia, com média de 211,82 ton/dia e mediana 58,52 ton/dia.

A Qss no período de 2011/2012 apresentou Qss igual a 0,89 ton/dia e máxima de 681,95 ton/dia. A média foi 128,26 ton/dia e a mediana foi de 58,24 ton/dia.

No ano de 2011 e 2012 as precipitações ocorridas durante o ano foram inferiores as precipitações médias com algumas chuvas de maior intensidade no período onde pode ser observado que a curva chave deste período se enquadra nos valores mais baixos da curva do período de 2007 a 2010.

Para o período de 2014/2015 a  $Q_{ss}$  mínima foi de 24,51 ton/dia e a máxima de 849,73 ton/dia, a média foi 245,37 ton/dia e a mediana foi 151,81 ton/dia.

#### 5.8.4 Curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão em um único período

A figura 29 ilustra a curva-chave única da descarga de sedimentos em suspensão na seção do rio Vacacaí Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015. A equação da curva-chave é válida para descarga de sedimentos em suspensão dentro da faixa de 0,89 ton/dia 2071,51 ton/dia, para o período de 2007 a 2015 e pode ser expressa pela equação 122.

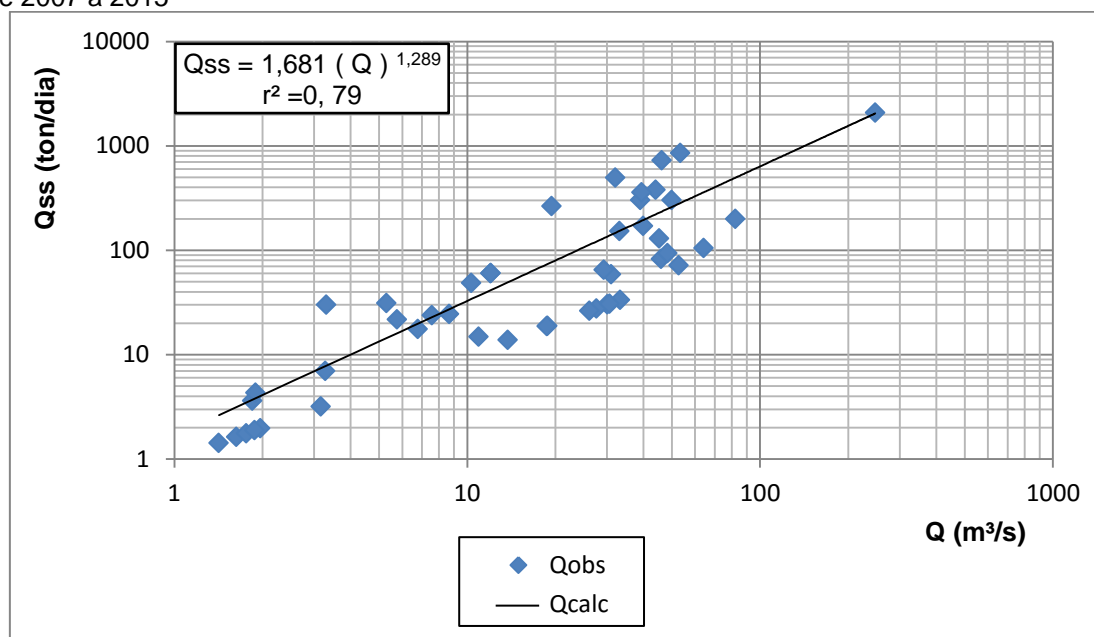
$$Q_{ss}=1,681 Q^{1,289}, \text{ com } r^2=0,79 \quad (122)$$

Onde:

$Q_{ss}$  = descarga sólida em suspensão (ton/dia);

$Q$ = vazão ( $m^3/s$ )

Figura 29 - Curva – Chave única da concentração de sedimentos em suspensão para o período de 2007 a 2015



Observou-se que para as medições realizadas no período de 2007 a 2015 que a descarga de sedimentos em suspensão (Qss) mínima de 0,89 ton/dia e a máxima de 2071,51 ton/dia.

A correlação apresentada entre Qss e Q foi de  $r = 0,89$  sendo considerada uma correlação positiva forte entre as variáveis avaliadas. O coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,79$ , ou seja, 79% da variação da descarga sedimentos em suspensão é explicada pela variação da vazão e 21% é explicada por outros fatores, tal como a intensidade das chuvas.

Observa-se que a Qss mínima (1,42 ton/dia) foi observada em 15/05/2012 e a máxima igual a 2071,51 ton/dia foi obtida em 25/09/2007. As menores Qss observadas apresentam-se, ao longo do monitoramento, nos meses de março, abril, junho, julho, outubro, novembro, já os picos foram obtidos no mês de outubro, com exceção para a registrada em 01/06/2012.

A menor descarga de sedimentos em suspensão foi encontrada no dia 15 de maio de 2012, onde a Qss foi de 0,89 ton/dia para uma descarga líquida de 1,42 m<sup>3</sup>/s, que pode ser explicada por apresentar precipitações não significativas nos dias que antecederam a coleta.

A maior descarga de sedimentos em suspensão foi encontrada em 25 de setembro de 2007, onde a Qss foi de 2071,51 ton/dia para uma descarga líquida de 247,17 m<sup>3</sup>/s, que pode ser justificada por grande volume de chuva entre 15 de setembro de 2007 a 24 de setembro de 2007 totalizando 206,3 mm.

A mediana foi 68 ton/dia, apresentando dois valores que se aproximaram em 9 de agosto de 2007 e 14 de outubro de 2015.

A média da Qss foi de 195,87 ton/dia, sendo o valor que mais se aproxima é o dia 6 de agosto de 2015 onde a Qss foi 199,52 ton/dia e descarga líquida de 82,31 m<sup>3</sup>/s. A precipitação antecedente foi de 4 de agosto de 2015 a 05 de agosto de 2015 com volume de 37,8 mm.

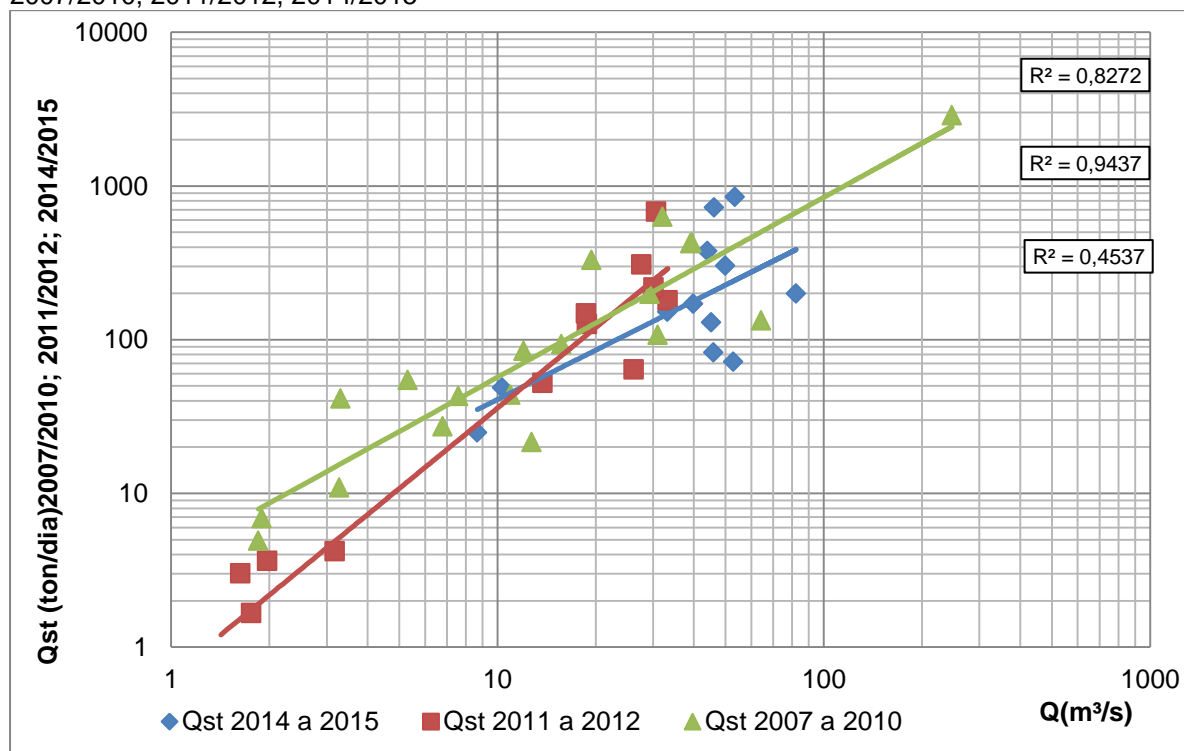
Observou-se a ausência de precipitações do dia 22 de julho de 2015 a 3 de agosto de 2015, porém o mês de julho de 2015 apresentou precipitações superiores a média mensal para o mês, o que explica uma maior descarga líquida. A Qss não acompanhou o crescimento da descarga líquida que pode ser explicada por precipitações anteriores ocasionando uma maior umidade do solo

provocando o selamento superficial do solo. As chuvas de 13/07/2015 a 21/07/2015 resultaram em um volume acumulado foi de 186,9 mm.

### 5.8.5 Curva-chave da descarga total de sedimentos em períodos separados

A figura 30 ilustra a descarga total de sedimentos na seção Vacacai Mirim, Restinga Sêca para os períodos avaliados de forma independente.

Figura 30 - Curva-chave da descarga de sedimentos total para os períodos em separado 2007/2010, 2011/2012, 2014/2015



Quando se avalia a descarga sólida total observa-se que nos períodos de 2011 a 2012 a Qst variou de 1,42 ton/dia a 682,08 ton/dia, de 2007 a 2010 variou de 4,92 ton/dia a 2885,78 ton/dia e no período de 2014 a 2015 a Qst variou de 24,89 ton/dia a 850,40 ton/dia.

Observa-se que Qst mínima (0,89 ton/dia) foi observada em 15/05/2012 e a máxima igual a 2885,78 ton/dia foi obtida em 25/09/2007.

A menor descarga de sedimentos total foi encontrada no dia 15 de junho de 2012, onde a Qst foi de 0,89 ton/dia para uma descarga líquida de 1,42 m³/s,

que pode ser justificada pelo fato do mês de junho de 2012 apresentar precipitações inferiores a média do mês e os dias que antecederam a coleta não apresentaram precipitações significativas.

A maior descarga de sedimentos total foi obtida no dia 25 de setembro de 2007, no qual a Qst foi de 2885,78 ton/dia para uma descarga líquida de 247,17 m<sup>3</sup>/s, que pode ser justificada por um grande volumes de chuva de 15 de setembro de 2007 a 24 de setembro de 2007 totalizando 206,3 mm.

O impacto da frequência dos eventos na produção de sedimento pode ser influenciado por vários processos hidrológicos independentes, tais como umidade, saturação dos solos, erosão da encosta que na nessa bacia é relativamente alta, diluição de escoamento de base e fornecimento de sedimentos através de canal de erosão que são predominantes em bacia hidrográfica (DODINÉ, 2013).

Nos períodos de 2007 a 2010 e de 2011 a 2012 as curvas de descarga total de sedimentos se assemelham quanto ao seu comportamento de crescimento, diferenciando-se da curva da QsT do período de 2014 a 2015. A curva de QsT de 2007 a 2010 apresenta maior faixa de variação entre os três períodos avaliados sendo atribuído a um maior período de monitoramento.

No período de 2014-2015 observa-se um aumento na descarga total de sedimentos para uma mesma vazão, no qual se observa um avanço das áreas agrícolas para as áreas de APP, sem o respeito aos limites mínimos exigidos por lei para preservação da mata ciliar do entorno do rio Vacacaí Mirim.

De acordo com Lowrance et al. (2002) a adoção de áreas de preservação permanente nas áreas ciliares pode ser extremamente eficiente para estabilização das margens, resistência ao fluxo da onda de cheia, filtragem de poluentes e interceptação dos sedimentos provenientes das lavouras. A adoção e respeito das APPs permitiria assim uma redução do sedimento que atinge o corpo hídrico e que poderia ser um contaminante da água

Uma maior quantidade de sedimentos para uma mesma vazão pode ser explicado pelo excesso de chuvas do período avaliado e as práticas de manejo (como incorporação da matéria orgânica após a colheita do arroz que leva a uma maior exposição do solo, além, da falta de atendimento as leis que regem o código florestal brasileiro (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012), no que diz

respeito as margens mínimas de preservação permanente das matas ciliares do rio Vacacaí Mirim, o que provoca uma maior perda de solo, sendo que é carreado para o corpo hídrico.

#### 5.8.6 Curva-chave única da descarga total de sedimentos para todo o período

A figura 31 apresenta a curva-chave única da descarga de sedimentos total na seção do rio Vacacai Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015. A equação da curva-chave é válida para descargas sólidas totais maiores ou iguais a 0,89 ton/dia e inferiores a 2885,78 ton/dia, pode ser expressa pela equação 123.

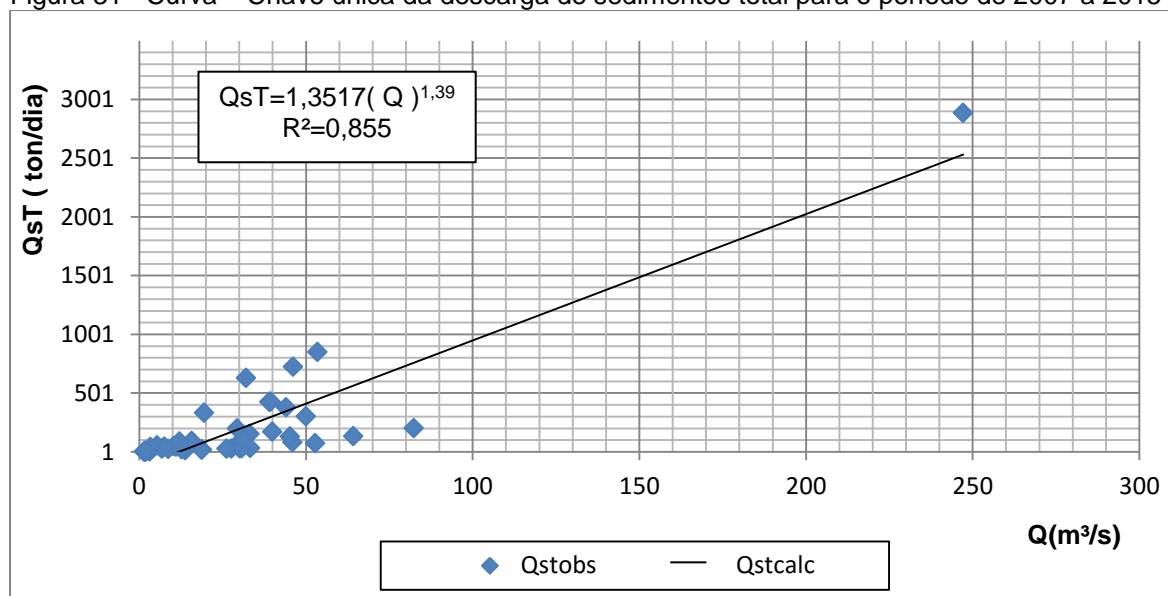
$$QsT=1,3517( Q )^{1,39}, \text{ com } r^2=0,855 \quad (123)$$

Onde:

$QsT$  = Descarga sólida total (ton/dia);

$Q$  = Vazão ( $m^3/s$ )

Figura 31 - Curva – Chave única da descarga de sedimentos total para o período de 2007 a 2015



Observou-se para as medições realizadas no período de 2007 a 2015 que a descarga de sedimentos total (QsT) mínima foi 0,89 ton/dia e a máxima de 2885,71 ton/dia.

A correlação apresentada entre a descarga de sedimentos total foi  $r=0,925$  entre as variáveis descarga de sedimentos total e a descarga líquida. O coeficiente de determinação foi  $r^2=0,855$ , significa que 85,5% da variação da descarga de sedimentos total é explicada pela variação da vazão.

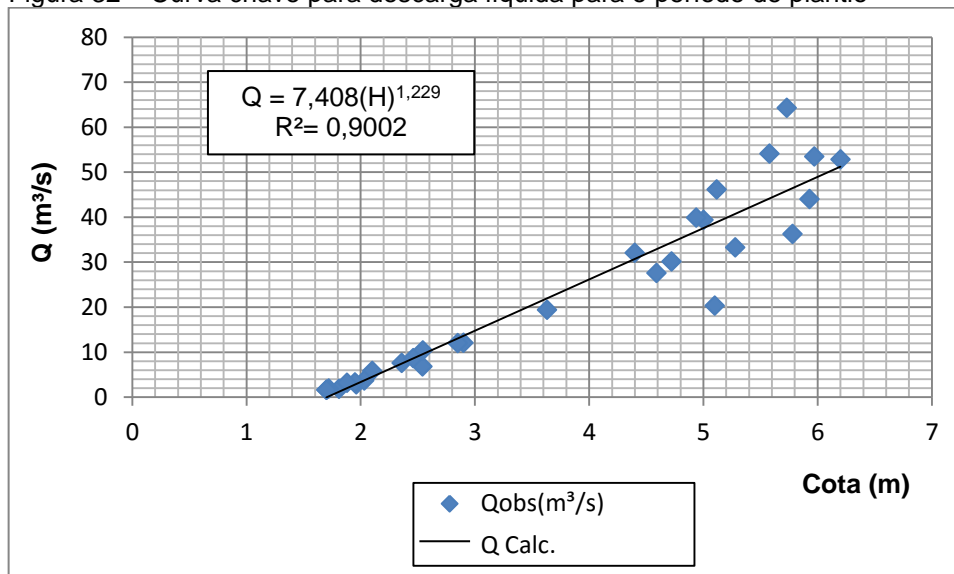
### **5.9 Influências da retirada de água para cultivo e épocas de preparo do solo para plantio**

Após comparações temporais das descargas líquidas, de concentrações de sedimentos em suspensão e descargas de sedimentos faz-se necessário avaliar estas descargas e concentrações visando relacionar as variações com épocas de preparo do solo para o cultivo do arroz, épocas com e sem cultivo e se a retirada de água para irrigação pode afetar as características nos regimes de vazão e sedimentos neste período.

#### **5.9.1 Curva Chave período de plantio orizicola**

Com base nos dados obtidos para o período de 2007 a 2015 e uma melhor visualização da variação temporal do período de plantio, de outubro a março, é apresentada uma curva-chave da descarga líquida neste período, ilustrada na figura 32.

Figura 32 – Curva chave para descarga líquida para o período de plantio



Salienta-se que equação da curva-chave é válida para cotas maiores ou iguais a 1,70 m e inferiores a 6,20 m, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 124.

$$Q = 7,408(H)^{1,229}, \text{ com } r^2 = 0,9002 \quad (124)$$

Onde:

Q= vazão em (m<sup>3</sup>/s);

H= cota em (m)

No período de outubro a março de 2007 a 2014 e de outubro a dezembro de 2015 pode observar-se que há uma grande amplitude de variação na vazão e cota do rio Vacacaí Mirim. Este fato pode ser atribuído a retirada de água para irrigação da cultura do arroz e a precipitação de grandes volumes de chuva em alguns dos períodos observados.

As cotas variaram de 1,70 m a 6,20 m e vazões entre 1,63 m<sup>3</sup>/s a 64,25 m<sup>3</sup>/s. Apresentou uma correlação positiva muito forte entre as variáveis cota e vazão ( $r = 0,9488$ ) e coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,9002$ ), ou seja, onde 90,02% da variabilidade da vazão pode ser explicada pela variação da cota ou vice e versa.



Observou-se a menor descarga líquida (Q) foi encontrada no dia 22 de novembro de 2011, onde a Q foi de 1,63 m<sup>3</sup>/s, para a cota de 1,7 m que pode ser explicada por esta época ocorrer o bombeamento de água do rio Vacacaí Mirim para manter a altura da lâmina da água para a cultura devido a ausência de chuvas no período de 12 de novembro de 2011 a 21 de novembro de 2011.

A maior descarga líquida foi obtida no dia 14 de janeiro de 2010, onde a Q foi de 64,25 m<sup>3</sup>/s e cota de 5,73 m, onde que pode ser explicado por precipitações acumuladas de 173,2 mm do período de 04 de janeiro de 2010 a 12 de janeiro de 2010.

As medianas para a descarga líquida e cota foram de 15,73 m<sup>3</sup>/s e 3,26 m. As médias encontradas respectivamente foram 22,55 m<sup>3</sup>/s e a cota 3,68 m.

As cotas e descargas líquidas para o período de cultivo apresentaram variações no período avaliado, o que pode ser atribuído, ao bombeamento da água para irrigação, associado a períodos de estiagem e em contraste grandes volumes de chuva, em pequenos intervalos de tempo, provocando grandes volumes de escoamento.

#### 5.9.2 Curva chave do período sem plantio de arroz (abril a setembro)

A figura 33 ilustra a curva chave para descarga líquida do período de 2007 a 2015, no período sem plantio com duração de abril a setembro. A equação da curva-chave é válida para cotas maiores ou iguais a 1,65 m e inferiores a 6,89 m, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 125.

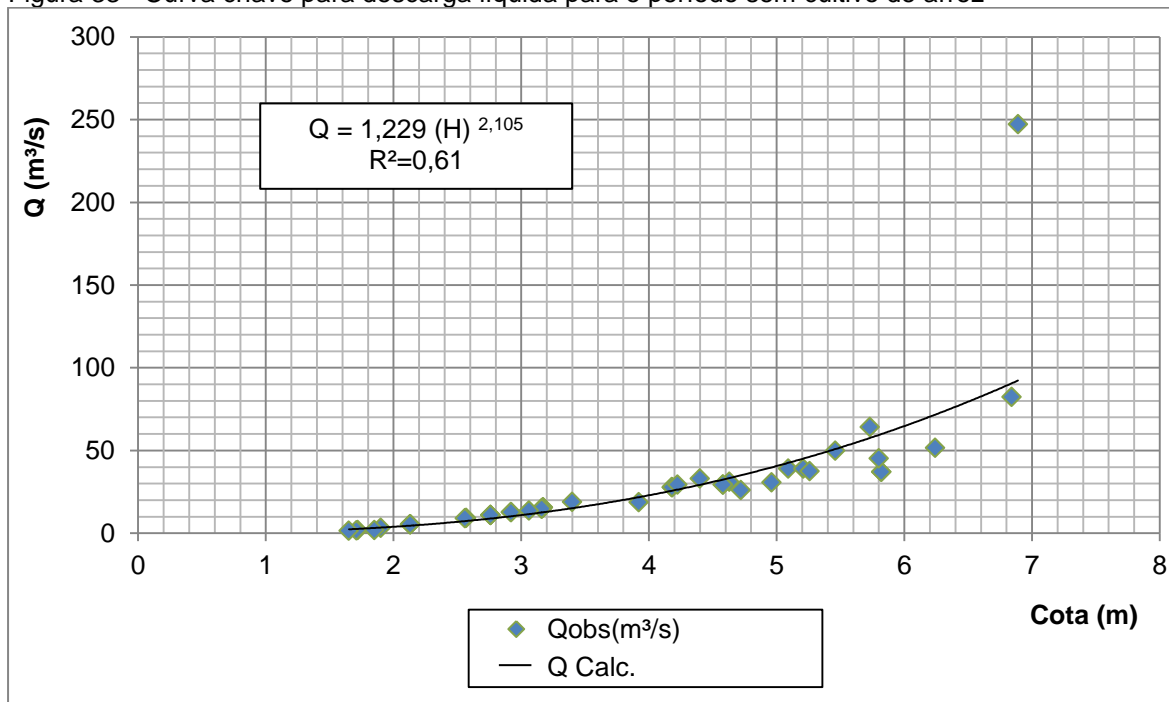
$$Q = 1,229 (H)^{2,105}, \text{ com } r^2=0,61 \quad (125)$$

Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

H= cota (m)

Figura 33 - Curva chave para descarga líquida para o período sem cultivo de arroz



No período de abril a setembro de 2007 a 2015 para fins de comparação considerou-se o período pós colheita e período de preparo do solo para o plantio a partir de setembro e outubro. Observa-se que no período também há uma grande variabilidade de cotas e vazões do rio Vacacai Mirim. Esta variação pode ser explicada devido a não retirada de água para irrigação do rio pois estas áreas encontram-se em pousio ou utilizadas para plantio de pastagens de inverno. O período coincide com o período de ação de frentes frias com chuvas de maior tempo de duração com alguns períodos de estiagem que explicariam alguns valores de cota e vazão baixos.

Evidenciou-se uma grande amplitude tanto nas cotas quanto nas vazões. As cotas variaram de 1,65 m e 6,89 m e vazões entre 1,42  $m^3/s$  e 247,17  $m^3/s$ . Foi encontrada uma correlação entre as variáveis cota e vazão ( $r=0,781$ ) e coeficiente de determinação ( $r^2=0,61$ ) onde 61% da variabilidade da vazão pode ser explicada pela variação da cota ou vice e versa.

A menor descarga líquida ( $Q$ ) foi encontrada no dia 15 de maio de 2012, com valor de  $Q = 1,42 m^3/s$  para a cota de 1,65 m, sendo observado um pequeno volume precipitado (13,8 mm) no dia 12 de maio de 2012.

A maior descarga líquida foi obtida no dia 25 de setembro de 2007, quando a descarga líquida foi de 247,173  $m^3/s$  e cota foi 6,89 m. Isto pode ser

explicado pelo grande volume precipitado no período que antecede a amostragem além do extravasamento do rio para este evento.

As medianas para as descargas líquidas foram 18,76 m<sup>3</sup>/s e cota 3,66 m. As médias encontradas foram respectivamente 28,48 m<sup>3</sup>/s e 3,85 m.

A Q é influenciada pelo período de plantio pois para o período sem plantio foi encontrado  $r^2=61\%$  enquanto para o período de plantio  $r^2 = 0,9002$ , no período sem cultivo ocorreu uma grande variação entre a Q mínima e a Q máxima foi maior que no período com cultivo assim como as cotas observadas. Isso justifica a correlação e coeficiente de determinação menores para o período sem cultivo.

### 5.9.3 Curva chave da Css do período com plantio de arroz (outubro a março)

A figura 34 ilustra a curva-chave da concentração de sedimentos em suspensão na seção do rio Vacacai Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015 para período com plantio de outubro a março.

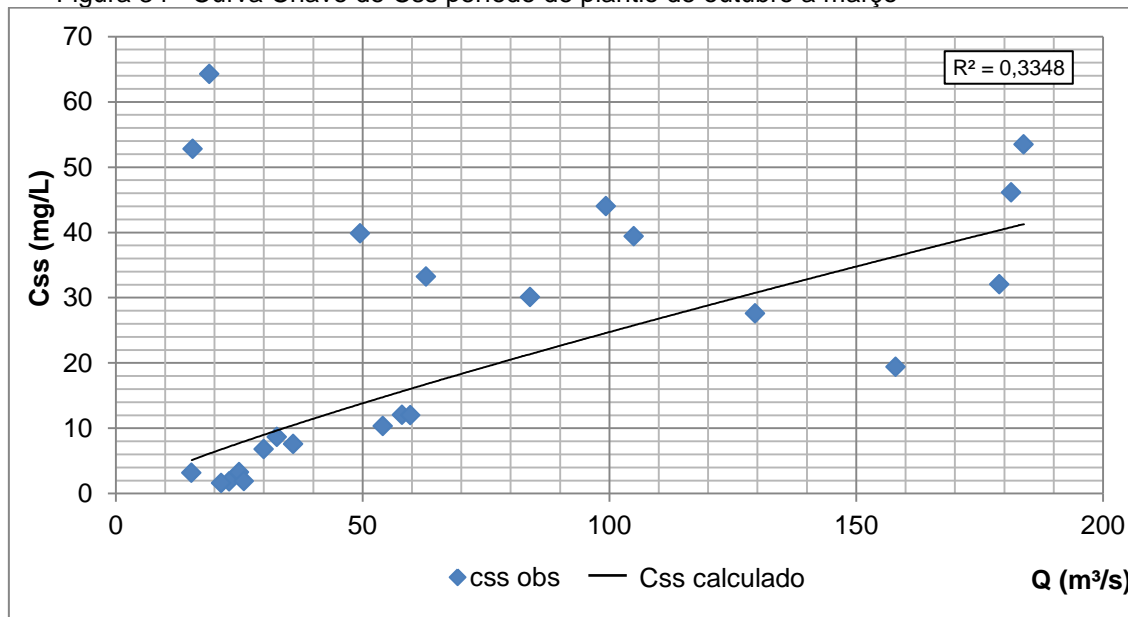
A equação da curva-chave é válida para concentração de sedimento em suspensão maiores ou iguais a 15,38 mg/L e inferiores a 183,96 mg/L, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 126.

$$C_{ss}=31,022(Q)^{0,267}. \text{ com } r^2=0,335 \quad (126)$$

Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

C<sub>ss</sub>= Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)

Figura 34 - Curva Chave de C<sub>ss</sub> período de plantio de outubro a março

Observou-se que para o período com plantio as concentrações de sedimentos em suspensão variaram de 15,38 mg/L e inferiores a 183,96 mg/L.

A correlação apresentada entre a concentração de sedimentos em suspensão e a vazão foi de  $r=0,550$ . O coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,335$ , isto significa que 33,5% da variação da descarga de sedimentos em suspensão é explicada pela variação da vazão e 67,5 % da variação é explicada por outras variáveis, como volume de chuvas e desenvolvimento da cultura do arroz.

Observou-se que a menor concentração de sedimentos em suspensão foi encontrada em 8 de novembro de 2011, onde a C<sub>ss</sub> foi de 15,38 mg/L para uma descarga líquida, de 3,17 m³/s, que pode ser explicada pela ausência de chuvas no período antecedente ao monitoramento.

A maior descarga total de sedimentos foi obtida em 22 de outubro de 2014, onde a C<sub>ss</sub> foi de 183,96 mg/L, para uma descarga líquida de 53,46 m³/s., que pode ser explicada pelo volume de chuva acumulado no período de 17 de outubro de 2014 a 20 de outubro de 2014 totalizando 114,6 mm.

#### 5.9.4 Curva chave da C<sub>ss</sub> do período sem plantio de arroz (abril a setembro)

A figura 35 ilustra a curva-chave da concentração de sedimentos em suspensão na seção do rio Vacacai Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015 para período sem plantio de abril a setembro.

A equação da curva-chave é válida para concentração de sedimentos em suspensão maior ou igual a 5,00 mg/L e inferiores a 257,38 mg/L, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 127.

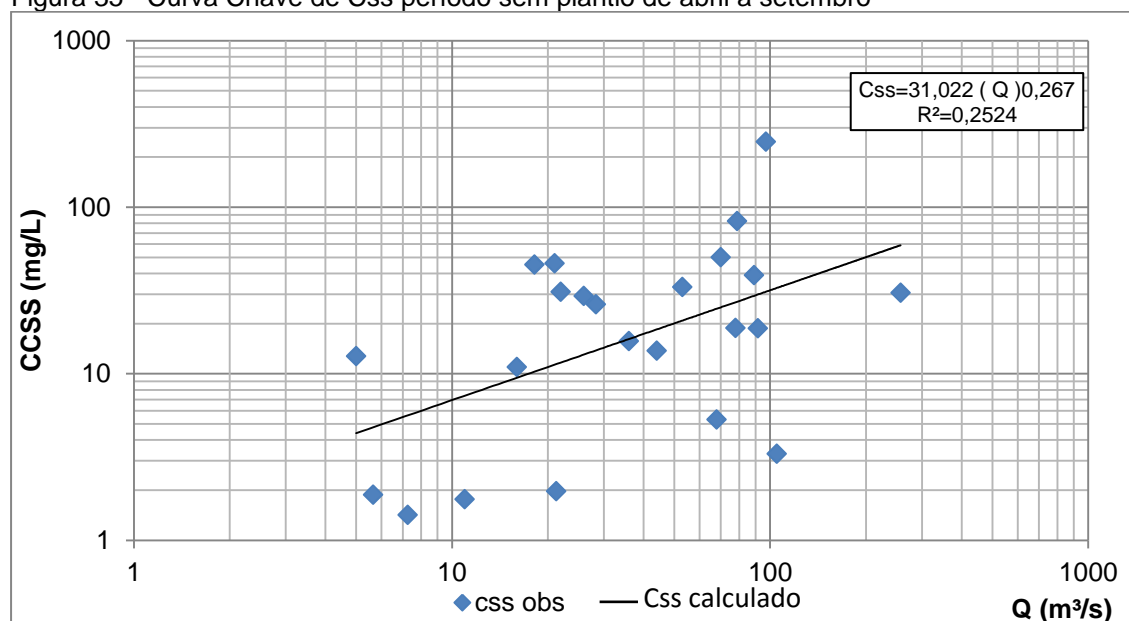
$$C_{ss}=31,022 ( Q )^{0,267}, \text{ com } r^2=0,2524 \quad (127)$$

Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

C<sub>ss</sub>= Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)

Figura 35 - Curva Chave de C<sub>ss</sub> período sem plantio de abril a setembro



Observou-se que para o período sem plantio, de abril a setembro, onde as áreas utilizadas para cultura do arroz permanecem em pousio ou cultivo de pastagens de inverno, as C<sub>ss</sub> variaram de 5,00 mg/L e inferiores a 257,38 mg/L. A correlação apresentada entre a concentração de sedimentos em suspensão e a vazão foi de  $r=0,502$  entre as variáveis concentração de sedimentos em suspensão e a vazão.

O coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,2524$ , isto significa que 25,24% da variação da concentração de sedimentos em suspensão é explicada pela variação da vazão.

Observou-se a menor concentração de sedimentos em suspensão em 17 de julho de 2007, onde a C<sub>ss</sub> foi de 5 mg/L para uma descarga líquida de 12,73 m<sup>3</sup>/s, sendo que o menor valor da C<sub>ss</sub> pode ser explicada pela ausência de precipitações ocorridas no período antecedente.

A maior descarga de sedimentos em suspensão foi obtida em 01 de junho de 2012, onde a C<sub>ss</sub> foi de 257,38 mg/L para uma descarga líquida de 30,67 m<sup>3</sup>/s, que pode ser explicado pela ocorrência de um grande volume de chuvas no dia 30 de maio de 2012 (124 mm).

De acordo com Minella et. al.(2007) os aspectos climáticos, apresentam três períodos distintos que são importantes para compreender a variabilidade da produção de sedimentos.

O primeiro é o período de maior erosividade das chuvas, que ocorre, em geral, nos meses de setembro e outubro. O segundo é aquele dos meses úmidos e frios (junho a agosto), quando, devido à baixa evapotranspiração, os solos mantêm-se encharcados e com grande potencial para gerar escoamento superficial.

Eventos de significativa precipitação nesse período transportam grande quantidade de sedimentos. O terceiro período compreende os meses de verão. Nesse período ocorre número menor de eventos significativos de chuva-vazão com produção de sedimentos, devido à maior frequência de estiagens, menor umidade do solo e maior capacidade de retenção do volume de água precipitado.

O evento que apresenta maior C<sub>ss</sub> (257,38 mg/L) no dia 01 de junho de 2012, se enquadra no segundo período descrito por Minella et al. (2007), por apresentar maior erosividade pelas chuvas devido aos solos úmidos, frios e a baixa evapotranspiração no período de junho a agosto

### 5.9.5 Curva chave da Qss do período com plantio de arroz (outubro a março)

A figura 36 ilustra a curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão na seção do rio Vacacai Mirim – Restinga Seca para o período de 2007 a 2015 para período com plantio de outubro a março.

A equação da curva-chave é válida para descarga de sedimento em suspensão maiores ou iguais a 3,02 ton/dia e inferiores a 849,73 ton/dia, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 128.

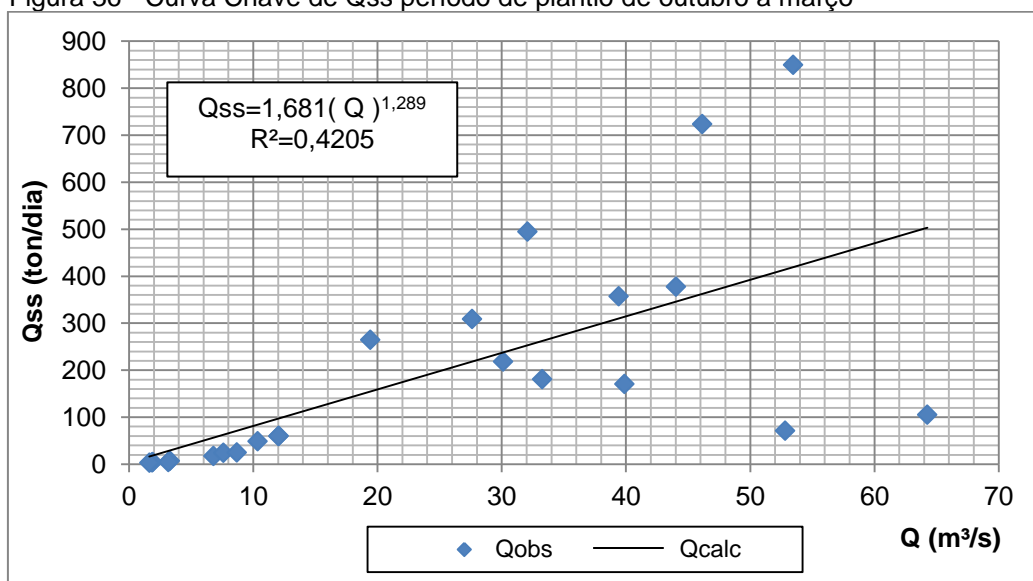
$$Q_{ss}=1,681( Q )^{1,289} . \text{ com } r^2=0,4205 \quad (128)$$

Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

Qss= Descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia)

Figura 36 - Curva Chave de Qss período de plantio de outubro a março



Observou-se que para o período com plantio as descargas de sedimentos em suspensão variaram de 3,02 ton/dia a 849,73 ton/dia.

A correlação apresentada entre a descarga de sedimentos em suspensão e a vazão foi de  $r=0,649$  sendo considerada uma correlação positiva moderada entre as variáveis de descarga de sedimentos em suspensão e a vazão. O coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,4205$ , isto significa que 42,05% da variação da descarga de sedimentos em suspensão é explicada pela variação da

vazão e 57,95 % da variação é explicada por outras variáveis, como volume de chuvas e desenvolvimento da cultura do arroz.

Observou-se que a menor descarga de sedimentos em suspensão foi encontrada em 22 de novembro de 2011, onde a Qss foi de 3,02 ton/dia para uma descarga líquida, de 1,63 m<sup>3</sup>/s, que pode ser explicada pela ausência de chuvas no período antecedente ao monitoramento.

A maior descarga total de sedimentos foi obtida em 22 de outubro de 2014, onde a Qss foi de 849,73 ton/dia, para uma descarga líquida de 53,46 m<sup>3</sup>/s., que pode ser explicada pelo volume de chuva acumulado no período de 17 de outubro de 2014 a 20 de outubro de 2014 totalizando 114,6 mm.

A mediana da Qss foi de 71,32 ton/dia encontrada em 14 de outubro de 2015. A média da Qss foi de 190,38 ton/dia, onde o valor que mais se aproxima é o dia 4 de outubro de 2011 onde a Qss foi 180,64 ton/dia e descarga líquida de 33,26 m<sup>3</sup>/s.

#### 5.9.6 Curva chave da Qss do período sem plantio de arroz (abril a setembro)

A figura 37 ilustra a curva-chave da descarga de sedimentos em suspensão na seção do rio Vacacaí Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015 para período sem plantio de abril a setembro.

A equação da curva-chave é válida para descarga sólida em suspensão maior ou igual a 0,89 ton/dia e inferiores a 2071,51 ton/dia, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 129.

$$Q_{ss}=0,248 ( Q )^{1,638}, \text{ com } r^2=0,89 \quad (129)$$

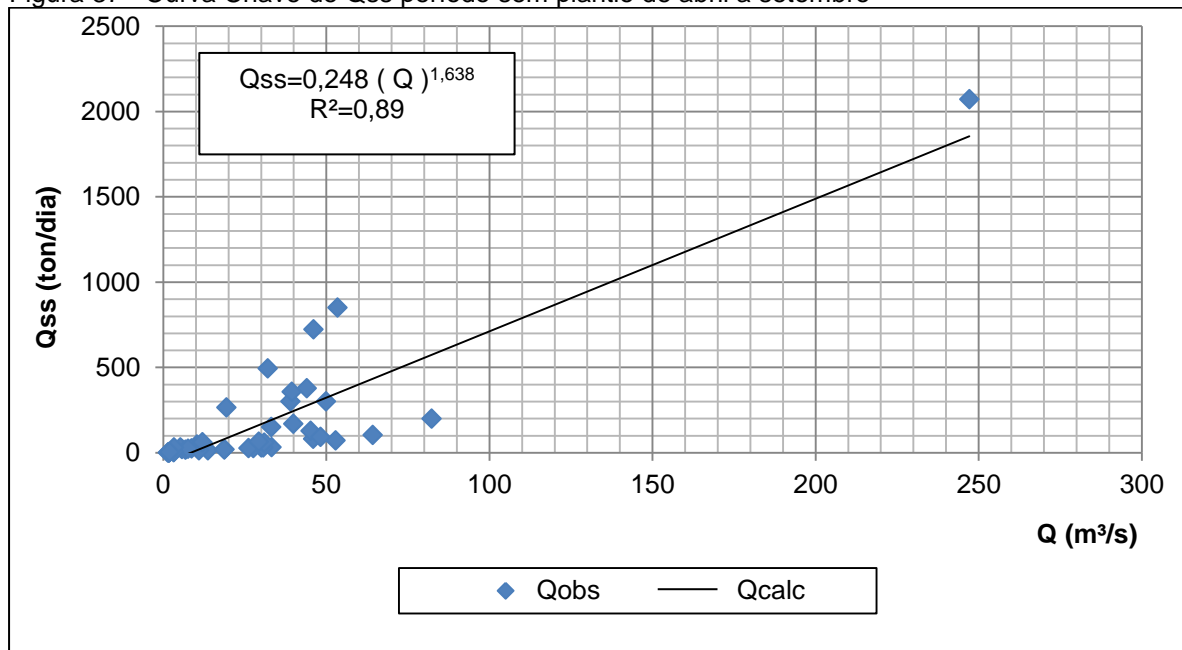
Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

Qss= Descarga de sedimentos em suspensão (ton/dia)



Figura 37 - Curva Chave de Qss período sem plantio de abril a setembro



Observou-se que para o período sem plantio, de abril a setembro, onde as áreas utilizadas para cultura do arroz permanecem em pousio ou cultivo de pastagens de inverno, as Qss variaram de 0,89 ton/dia e 2071,51 ton/dia.

A correlação apresentada entre a descarga de sedimentos em suspensão e a vazão foi de  $r=0,95$  entre as variáveis descarga sólida em suspensão e a vazão.

O coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,89$ , isto significa que 89% da variação da concentração de sedimentos em suspensão é explicada pela variação da vazão.

Observou-se a menor descarga de sedimentos em suspensão em 15 de junho de 2012, onde a Qss foi de 0,89 ton/dia para uma descarga líquida de 1,42 m<sup>3</sup>/s, sendo que o menor valor da Qss pode ser explicada pela ausência de precipitações ocorridas no período antecedente.

A maior descarga de sedimentos em suspensão foi obtida em 25 de setembro de 2007, onde a Qst foi de 2071,51 ton/dia para uma descarga líquida de 247,17 m<sup>3</sup>/s, que pode ser explicado pelo grande volume acumulado de chuvas que antecederam o dia de amostragem.

A mediana da Qss foi de 64,67 ton/dia encontrado em 9 de agosto de 2007. A média da Qss foi de 196,84 ton/dia, onde o valor que mais se aproxima

é em 6 de agosto de 2015 onde a  $Q_{ss}$  foi 199,52 ton/dia e descarga líquida de 82,31 m<sup>3</sup>/s

### 5.9.7 Curva chave da $Q_{st}$ do período com plantio de arroz

A figura 38 ilustra a curva-chave da descarga de sedimentos total na seção do rio Vacacai Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015 para período com plantio de outubro a março.

A equação da curva-chave é válida para descargas de sedimentos totais maiores ou iguais a 3,02 ton/dia e inferiores a 850,41 ton/dia, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 130.

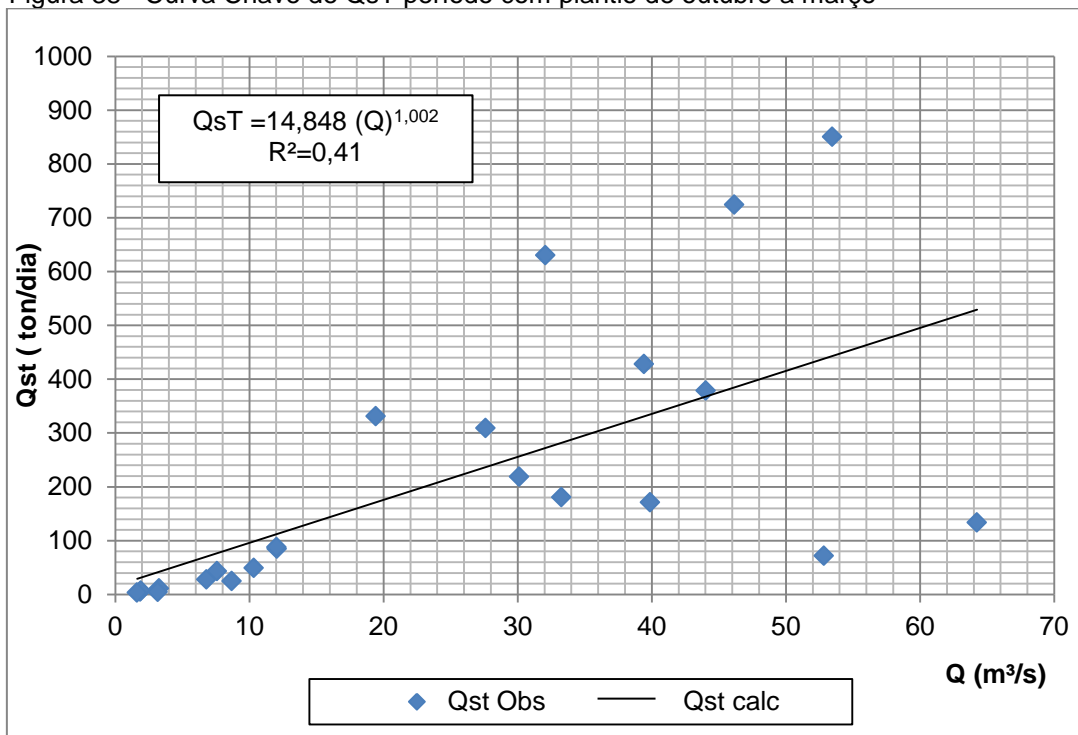
$$Q_{sT} = 14,848 (Q)^{1,002}, \text{ com } r^2=0,41 \quad (130)$$

Onde:

$Q$ = vazão (m<sup>3</sup>/s);

$Q_{st}$ = Descarga de sedimento total (ton/dia)

Figura 38 - Curva Chave de  $Q_{sT}$  período com plantio de outubro a março



Observou-se que para o período com plantio de outubro a março onde as descargas de sedimentos totais (QsT ) variaram entre 3,02 ton/dia e 850,41 ton/dia. A correlação apresentada entre a descarga de sedimentos total foi de  $r=0,64$  sendo considerada uma correlação positiva moderada entre as variáveis descarga de sedimentos totais e a vazão. O coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,41$ , isto significa que 41% da variação da descarga de sedimentos total é explicada pela variação da vazão.

A menor descarga de sedimentos total foi encontrada no dia 22 de novembro de 2011, onde a QsT foi de 3,02 ton/dia para uma descarga líquida de 1,63 m<sup>3</sup>/s que pode ser explicado pela ausência de chuvas entre 12 de novembro de 2011 a 21 de novembro de 2011.

A maior descarga total de sedimentos foi obtida em 22 de outubro de 2014, onde a QsT foi de 850,41 ton/dia, para uma descarga líquida de 53,462 m<sup>3</sup>/s, que pode ser explicada pelos grandes volumes acumulados precipitados que provocaram o aumento do transporte de sedimentos.

A mediana para Qst foi 87,91 ton/dia encontrada em 03 de dezembro de 2015. A média da QsT foi de 207,52 ton/dia, onde a Qst que mais se aproxima é em dia 10 de outubro de 2011 com QsT de 218,45 ton/dia e descarga líquida de 30,12 m<sup>3</sup>/s.

#### 5.9.8 Curva chave da QsT do período sem plantio de arroz

A figura 39 ilustra a curva-chave da descarga de sedimentos total na seção do rio Vacacaí Mirim – Restinga Sêca para o período de 2007 a 2015 para período sem plantio de abril a setembro.

A equação da curva-chave é válida para descargas de sedimentos totais maiores ou iguais a 0,89 ton/dia e inferiores a 2885,78 ton/dia, para o período considerado e pode ser expressa pela equação 131.

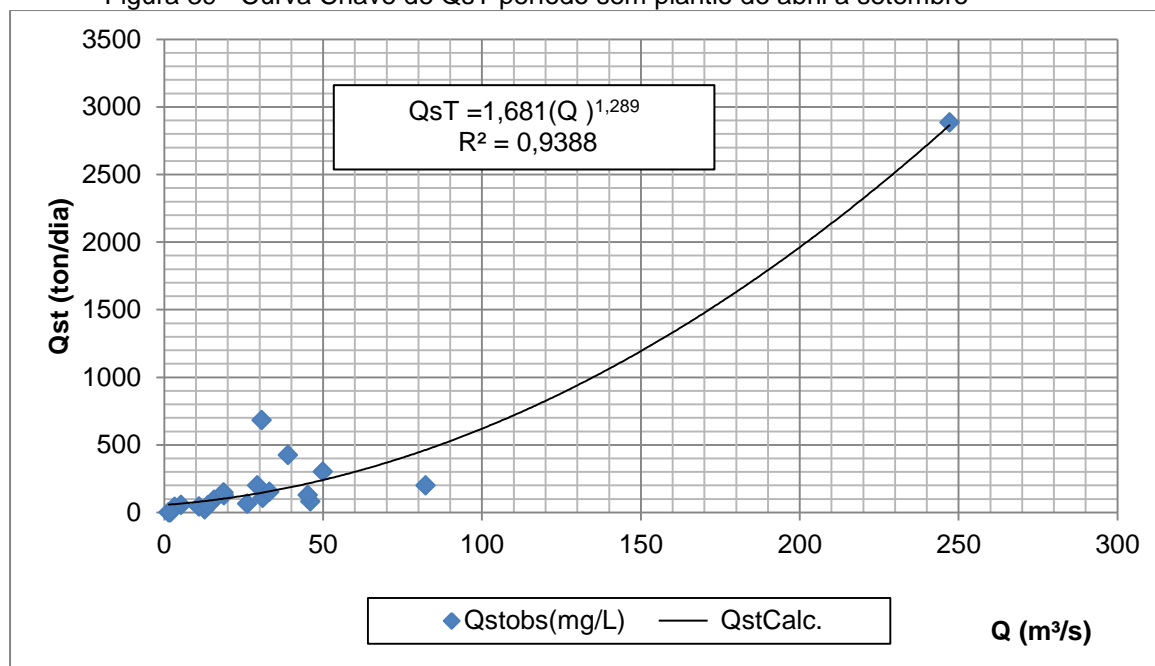
$$QsT = 1,681(Q)^{1,289}, \text{ com } r^2 = 0,9388 \quad (131)$$

Onde:

Q= vazão (m<sup>3</sup>/s);

QsT= Descarga de sedimento total (ton/dia)

Figura 39 - Curva Chave de QsT período sem plantio de abril a setembro



Observou-se que para o período com plantio de outubro a março onde as descargas de sedimentos totais ( $Q_{sT}$ ) variaram entre 0,89 ton/dia e 2885,78 ton/dia.

A correlação apresentada entre a descarga de sedimentos total foi de  $r=0,9689$  sendo considerada uma correlação positiva muito forte entre as variáveis descarga de sedimentos totais e a vazão. O coeficiente de determinação foi de  $r^2=0,9388$ , onde isto significa que 93,88% da variação da descarga total de sedimentos.

Observou-se a menor descarga total de sedimentos em 15 de junho de 2012, onde a  $Q_{sT}$  foi 0,89 ton/dia para uma descarga líquida de 1,42  $m^3/s$  que pode ser explicada pela ausência de chuvas no período entre 01 de junho de 2012 a 15 de Junho de 2012, antecedente a amostragem.

A maior descarga de sedimentos total foi obtida em 25 de setembro de 2007, com  $Q_{sT}$  de 2885,78 ton/dia para uma descarga líquida de 247,17  $m^3/s$ , que pode ser explicado pela precipitação acumulada de 206,3 mm no período (15/09/2007 a 24/09/2007) que antecedeu a amostragem.

A mediana foi de 93,46 ton/dia encontrada em 3 de julho de 2007 com a QsT de 93,46 ton/dia e descarga líquida de 15,70 m<sup>3</sup>/s. A precipitação ocorrida no mês de julho foi inferior a média do mês e a precipitação nos dias anteriores apresentaram baixos volumes acumulados.

A média da QsT foi 253,28 ton/dia, onde o valor que se aproxima é em 6 de agosto de 2015 com QsT de 200,08 ton/dia e descarga líquida de 82,31 m<sup>3</sup>/s

Há indícios de que a Qst é influenciada pelo período de plantio, pois para o período sem plantio foi encontrado um  $r^2=0,9388$ , enquanto para o período de plantio o  $r^2$  foi igual a 0,41, acompanhando o comportamento da Qss, pois essa compõe quase que a totalidade da Qst.

Diante disto, as práticas culturais para o preparo do solo, como seu revolvimento associada a chuvas de grande intensidade e volume em um curto intervalo de tempo, que ocorrem no período de outubro a março podem explicar o menor  $r^2$  para o período de plantio. uma vez que ocorre uma ampla variação da cobertura do solo (desde solo exposto e revolvido até solo completamente coberto pela cultura do arroz) neste período de plantio facilitando a erosão.

Dedoné (2013) em seu estudo constatou que a variabilidade intra-anual do período 2000 a 2010 mostra um padrão de erosão comum para a região sul do Brasil.

Conjuntamente, o plantio das culturas de verão ocorrem a partir de agosto. O manejo inadequado do solo, com baixa cobertura vegetal e sem barreiras de contenção, ocorre à coincidência das chuvas mais erosivas. durante os anos de 2000 a 2010, constatou na bacia que a produção de sedimentos no mês de outubro foi significativamente maior, seguidos dos meses de setembro outubro e dezembro. O estudo apresenta similaridade quando aos resultados obtidos por Dedoné (2013) devido a localização do atual trabalho e do autor.

### **5.10 Avaliação temporal da descarga sólida total mensal**

Para avaliar a descarga sólida total mensal em um único período (2007 a 2015) foram considerados os valores de descarga sólida mineral

### 5.10.1 Descarga sólida total mensal de 2007 a 2015

Na tabela 18 são apresentados a descarga sólida mensal e os totais para as descargas sólidas mensais de 2007 a 2015 para seção do rio Vacacaí Mirim.

Tabela 18 – Descarga sólida mensal do ano 2007 a 2015

Meses	Ano									Total 2007 a 2015 (ton)
	2007 (ton)	2008 (ton)	2009 (ton)	2010 (ton)	2011 (ton)	2012 (ton)	2013 (ton)	2014 (ton)	2015 (ton)	
Jan	384,50	463,97	74,08	12732,33	16,88	567,52	40.612,58	11.841,32	8.063,39	1.269.354
Fev	1.072,08	72,21	288,58	1195,75	2.163,69	1.383,66	5.771,17	11.043,03	7.013,41	
Mar	2.056,57	612,89	1.323,87	344,68	5.085,97	2.187,22	1.773,49	65.738,29	7.109,86	
Abr	1.110,59	212,00	80,29	479,04	54.204,61	679,52	3.130,33	1.114,16	5.738,22	
Mai	1.577,75	577,71	134,79	1485,05	569,11	234,51	765,95	37.231,00	5.811,58	
Jun	2.080,98	3.574,53	550,75	3083,22	26.742,45	9.829,85	1.024,76	6.087,30	8.472,58	
Jul	2.572,69	4.395,21	1.756,65	7463,12	36.119,37	6.364,08	2.551,52	24.166,42	9.887,52	
Ago	307,30	5.680,44	3.562,38	1425,14	4.395,21	1.563,84	2.447,26	85.505,44	10.140,15	
Set	1.542,13	2.876,65	8.350,13	8659,45	711,99	19.594,80	1.253,96	161.201,40	9.756,77	
Out	7.258,86	3.800,85	2.488,64	640,07	68.227,28	73.112,99	35.929,31	1.122,96	9.577,26	
Nov	434,40	1.936,97	8.839,39	66,22	8.144,91	1.817,26	173.542,80	8.457,01	8.900,86	
Dez	154,90	119,74	9.087,32	172,03	1.210,55	20.911,38	14.070,65	8.452,73	9.050,34	
Total (ton/ano) <sup>1)</sup>	20.552	24.323	36.536	37.746	207.592	138.246	282.873	421.961	99.521	

O valor total da descarga sólida para o período de 9 anos(2007 a 2015) na bacia do rio Vacacaí Mirim foi de 1.269.354,31 toneladas ou 1387,27 ton/km<sup>2</sup> e o equivalente a perda de uma camada do solo no período foi 0,55 mm ou 0,06 mm/ano onde considerando-se peso específico do sedimento igual a 2,5 ton/m<sup>3</sup>.

A descarga sólida total do período e o equivalente a perda de uma camada do solo no período entre 2014 e 2015 ficou abaixo da descarga média e da perda de camada do solo entre 2007 e 2015.

Andrade Neto (2011) obteve uma taxa de sedimentação para a Lagoa dos Patos da camada superficial de sedimentos de 0,1mm/ano

O mês que apresentou maior descarga sólida mensal foi o mês de novembro de 2013 com 173.542,80 toneladas ou 189,66 ton/km<sup>2</sup> que pode ser explicada por chuvas acima da média para este mês. O equivalente a perda de uma camada do solo no período foi de 0,08 mm/mês.

Os maiores valores de descarga sólida mensal foram encontrados nos meses de outubro de 2007, dezembro de 2009, janeiro de 2010, outubro de 2011, outubro de 2012, novembro de 2013 que corresponde ao período de plantio de arroz diferenciando-se apenas em agosto de 2007, setembro de 2014 e agosto de 2015 que correspondem ao período sem cultivo do arroz.

O maior valor encontrado para os totais das descargas sólidas mensais foi no ano de 2014 com 421.961,06 ton/ano ou 461,16 ton/km<sup>2</sup>/ano que corresponde ao equivalente a perda de uma camada do solo no período foi de 0,18 mm/ano

O mês que apresentou menor descarga sólida mensal foi o mês janeiro de 2011 com 16,88 toneladas ou 0,018 ton/km<sup>2</sup> que pode ser explicada por chuvas abaixo da média para este mês. O equivalente a perda de uma camada do solo no período foi de 0,00073 mm/mês.

Os menores valores de descarga sólida mensal foram encontrados nos meses de dezembro de 2007, fevereiro de 2008, janeiro de 2009, novembro de 2010 e janeiro de 2011 que correspondem aos meses da cultura do arroz, e nos meses de maio de 2012, maio de 2013, maio de 2015 que correspondem ao período sem plantio de arroz.



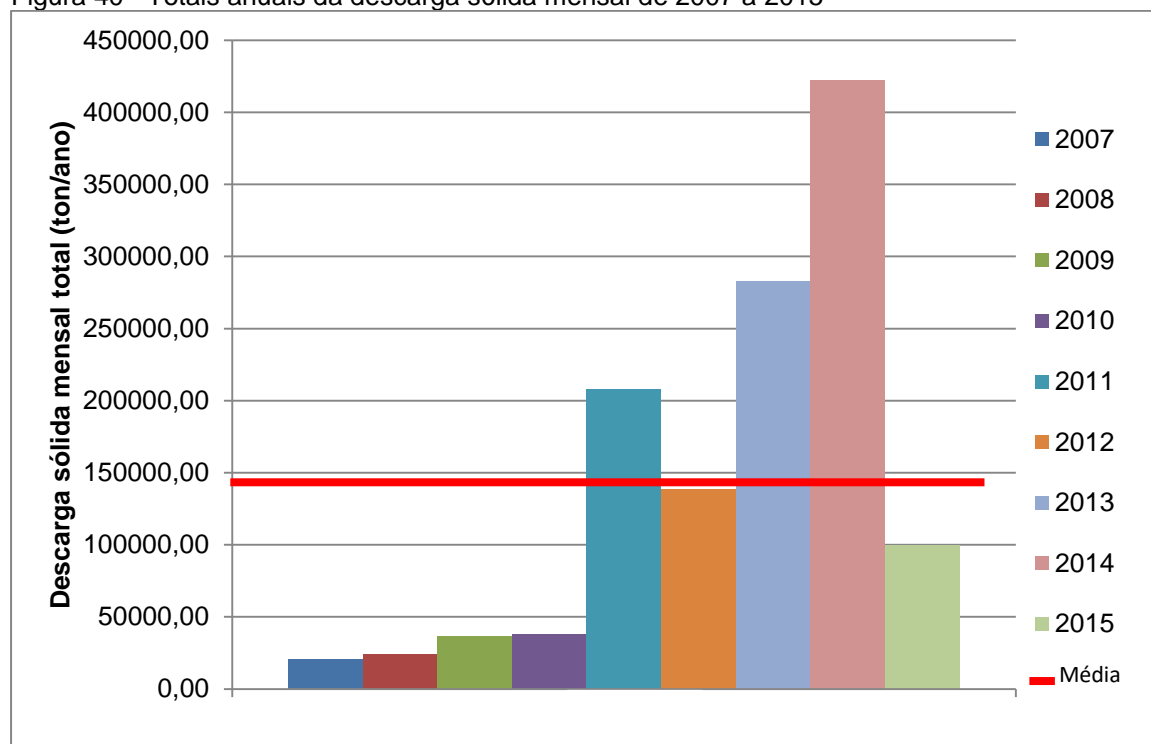
O menor valor encontrado para o totais das descargas sólidas mensais foi no ano de 2014 com 20.552,75 ton/ano ou 22,46 ton/km<sup>2</sup>/ano que corresponde ao equivalente a perda de uma camada do solo no período de 0,0089 mm/ano.

O valor dos nove anos avaliados (2007 a 2015) para produção de sedimentos na bacia do rio Vacacaí Mirim foi de 154,14 ton/km<sup>2</sup>/ano diferenciando da média dos anos de 2014 e 2015 que foi 102,78 ton/Km<sup>2</sup>/ano.

Dedoné (2013) em seu estudo constatou que o valor médio dos dez anos (2000 a 2010) da produção de sedimentos na bacia do rio Conceição 140<sup>o</sup>ton/km<sup>2</sup>/ano se aproximou da média dos dois anos de monitoramento, 2011 e 2012, que foi de 141 ton/km<sup>2</sup>/ano.

A figura 40 apresenta a média e os totais anuais da descarga sólida mensal de 2007 a 2015 para a bacia do rio Vacacaí Mirim.

Figura 40 - Totais anuais da descarga sólida mensal de 2007 a 2015



A média encontrada dos totais anuais das descargas mensais foi 141.039,37 toneladas ou 154,14 ton/km<sup>2</sup>. Observou-se que os totais anuais da descarga sólida mensal ficaram acima da média nos anos de 2011, 2013 e 2014.

Na tabela 19 são apresentados os equivalentes a perda de uma camada do solo nos três períodos avaliados

Tabela 19 - Equivalente a perda de uma camada do solo no período nos 3 períodos avaliados

<b>Origem dos dados</b>	<b>Equivalente a perda de uma camada do solo no período (mm/ano)</b>
Relatório final do Edital Universal -CNPQ 2007	0,09
Rizzardi (2013)	0,08
Neste estudo	0,05

O equivalente a perda de uma camada do solo no período apresentada no período de 2007 a 2010 no relatório de Paiva (2011) para o rio Vacacaí Mirim foi 0,09 mm/ano, no período de 2012 a 2013, apresentado por Rizzardi (2013), foi 0,08 mm/ano e no atual estudo de 2014 a 2015 foi 0,05 mm/ano. Diante disto, constata-se uma redução nos valores equivalentes a perda de uma camada do solo nos períodos analisados.

Ressalta-se que estes valores de perda de camada removida do solo são válidos apenas para avaliação dos dados obtidos de medições a campo, diferenciado-se dos valores da descarga sólida total mensal de todo período que foram determinados a partir de observações das variações horárias da cota da seção transversal do rio Vacacaí Mirim.

Ding et al.(2011) que avaliou 5 décadas (1956 a 2006) no rio Jualing obteve que a descarga anual de sedimentos pareceu ter uma diminuição significativa da tendência ao longo período. No seu estudo, a redução da descarga anual de sedimentos foi observada após o ano 1985, no qual ocorreu uma mudança substancial do nível dos sedimentos, atribuída à construção de numerosas barragens em 1980.

No entanto, após o ano de 1985, dois períodos em sequencia (1986-1991 e 1992-2006). O período 1992-2006 foi caracterizado por uma baixa descarga de sedimentos, provavelmente devido à conservação do solo e da água, o que ocorreu no final dos anos 1980.

### **5.11 Avaliações dos mapas de uso e ocupação do solo e seus efeitos nas descargas líquidas e sólidas.**

Os mapas de uso e ocupação do solo foram confeccionado a partir de imagens do satélite LANSAT-7, através do sensor ETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus), que compreende 8 bandas espectrais; três no visível, uma no infravermelho próximo, duas no infravermelho médio, uma no infravermelho termal e uma banda pancromática.

A imagem do mapa confeccionado por Casagrande (2004) foi adquirida no ano de 1998, tendo uma resolução espacial de 30 metros e foi classificada em 8 classes de uso:

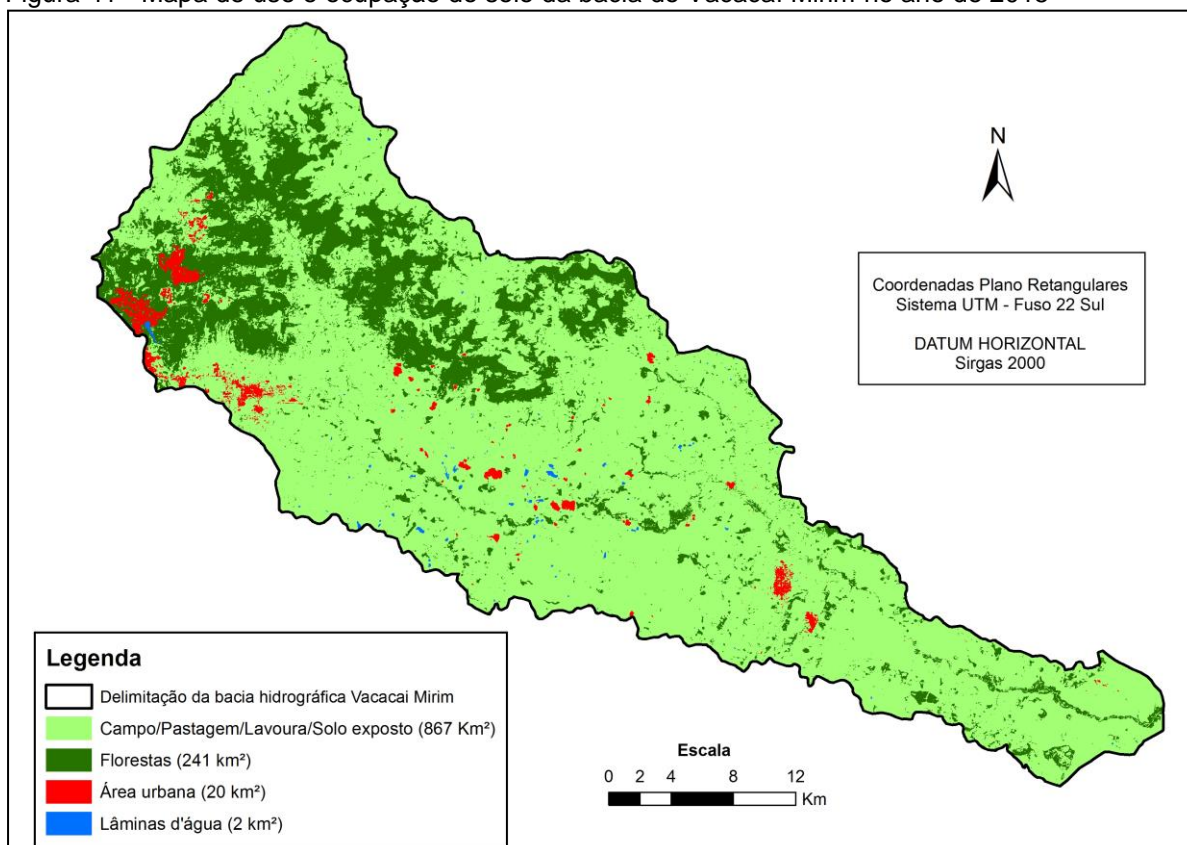
- Solo exposto (lavoura de arroz);
- Água (barragens);
- Campo;
- Agricultura;
- Floresta nativa;
- Banhado;
- Área urbana.

A imagem do estudo atual foi obtida no ano de 2015, com a mesma resolução espacial utilizada por Casagrande (2004). As classes de uso de solo foram agrupadas em 4 classes de uso devido ao propósito do estudo e algumas classes utilizadas por se assemelharem quanto ao uso. As classes foram distribuídas da seguinte forma:

- Áreas agrícolas: englobou as classes agricultura, campo/pastagem, solo exposto pois todas estas áreas tem a utilização de fins para agricultura portanto foram englobadas na mesma classe.
- Florestas: englobou as classes floresta nativa e florestas implantadas uma vez que o peso da classe floresta implantada era quase nula optando-se pela união destas 2 classes.
- Lamina de água: englobou a classe lamina de agua e banhados.
- Área urbana foi mantida a classe inalterada.

A figura 41 ilustra o mapa de uso e ocupação do solo da bacia do rio Vacacaí Mirim para o ano de 2015.

Figura 41 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Vacacaí Mirim no ano de 2015



As possíveis diferenças nos valores de uso do solo podem ser atribuídas às datas de obtenção das imagens, e à qualidade das imagens dos satélites utilizados anteriormente.

Na tabela 20 são apresentadas as comparações das classes de uso e ocupação do solo da bacia do Vacacaí Mirim relatadas em Casagrande (2004) e as obtidas neste estudo com imagem de 2015.

Tabela 20 – Comparação das classes de uso e ocupação do solo da bacia do Vacacaí Mirim

Classes de uso e ocupação do solo	Casagrande (2004)		2015	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Áreas agrícolas	773,59	67,52	867,00	76,73
Florestas	324,54	28,33	241,00	21,33
Lâmina de água	33,93	2,96	2,00	0,18
Área urbana	13,66	1,19	20,00	1,77

As áreas agrícolas apresentaram um aumento de 9,21% ou 93,41 km<sup>2</sup> das áreas que compõem a bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim, no estudo de Casagrande 2004 a percentagem correspondia a 67,52% da área e no atual estudo a 76,73%.

A classe de florestas que são compostas por florestas nativas e florestas implantadas apresentou uma redução de 7 % ou 83,54 Km<sup>2</sup>, o que pode explicar o aumento na área agrícola. Essa redução pode ser atribuída às retiradas da mata ciliar do entorno do rio Vacacaí Mirim, das encostas e na porção mais elevada da bacia.

A área Urbana apresentou um aumento de 0,58% que corresponde ao aumento de 6,34 km<sup>2</sup> de participação na área da bacia. O aumento das áreas agrícolas e áreas urbanas e a redução das áreas de florestas deve ser vista com preocupação uma vez que pode ser atribuída a alterações antrópicas pela supressão de vegetação para aumento de áreas de plantio ou habitação. Esta pode provocar um aumento da exposição do solo, ocasionando um aumento nos processos erosivos e levando a um aumento nos valores da CSS, Qss e Qst .

Espíndola (2000) destaca que as atividades antrópicas provocam impactos nos recursos hídricos, como modificações devidas as alterações da vegetação nativa por reflorestamento, pastagens, culturas e edificações, que são significativos.

Evidenciou-se uma redução da classe de lâmina de água de 2,78 % onde Casagrande (2004) relatou 2,96 % e no estudo atual o valor encontrado foi 0,18%. Essa redução pode ser explicada por diferentes épocas do ano na obtenção da imagem para produção do mapa do solo. A imagem do atual estudo foi obtida no mês de agosto de 2014 em que no Rio Grande do Sul a estação do inverno pode apresentar baixos volumes de chuva, sendo considerado um período mais seco. Outra possibilidade de explicação é que o índice pluviométrico para o mês foi abaixo da média mensal para o mês de agosto, resultando em menor nível de reservatórios de água e áreas de banhado que compõem as regiões onde há o plantio do arroz.

Paim (2012) em seu trabalho que realizou avaliações temporais de três décadas de mapas de uso e ocupação do solo obteve resultados que as áreas agrícolas e áreas urbanas tiveram aumento, com redução das áreas de mata

nativa. Essas alterações associadas com outras variáveis contribuíram para o aumento dos volumes erodidos ao longo das décadas.

## **5.12 Avaliação de métodos de cálculos para estimar o transporte de sedimentos no Rio Vacacaí Mirim**

### **5.12.1 Estimativa e comparação com resultados anteriores, referente ao transporte de sedimentos na seção**

Na tabela 21 são apresentados os valores para a descarga sólida total medida e calculada pelos métodos de estimativa de cálculo para o transporte de sedimentos da seção do rio Vacacaí Mirim para o período de 2014 a 2015.

Tabela 21 - Descarga sólida total medida e calculada pelos métodos de cálculo para o transporte de sedimentos.

Data	QST (ton/dia)	MP&M (1948) (ton/dia)	Colby (1957) (ton/dia)	E. Mod. (1955) (ton/dia)	A&W (1973) (ton/dia)	Yang (1973) (ton/dia)	V. Rijn (1984) (ton/dia)	Karim (1998) (ton/dia)	Cheng (2002) (ton/dia)	Laursen (1958) (ton/dia)	Toffaleti (1969) (ton/dia)	E&H (1967) (ton/dia)
22/10/2014	850,41	mna	462,21	mna	201,21	851,07	mna	202,98	16205,47	735,22	222,10	177,32
06/11/2014	723,93	38,38	420,38	658,58	332,71	1029,71	mna	462,01	11742,68	262,47	157,66	313,76
04/12/2014	48,74	6,11	99,95	42,48	mna	117,96	15,84	62,68	3013,73	62,52	12,85	86,78
23/12/2014	378,42	43,48	314,15	383,92	326,87	869,50	184,79	401,73	11909,38	410,99	181,20	285,11
16/01/2015	171,08	23,88	273,31	168,08	217,62	593,09	122,64	272,24	9105,40	154,03	88,35	186,44
04/03/2015	24,90	9,94	61,48	24,35	32,23	118,03	18,71	112,19	3321,45	212,61	9,59	142,36
01/04/2015	152,34	21,46	320,20	142,87	249,11	535,36	76,88	209,53	8598,22	412,57	133,86	331,62
29/05/2015	302,50	mna	324,84	281,00	303,43	786,62	mna	202,68	11193,83	528,25	mna	160,76
16/07/2015	82,61	16,47	305,79	52,94	218,95	410,98	66,31	157,44	9492,58	180,99	mna	174,65
22/07/2015	129,84	67,81	682,63	114,10	819,56	1671,44	mna	380,74	240006,80	817,86	422,26	619,66
06/08/2015	199,99	24,69	291,37	203,09	251,84	252,13	104,61	354,28	9582,81	473,45	144,40	300,50
14/10/2015	71,87	11,69	130,56	mna	mna	310,54	mna	193,58	3472,08	109,68	11,80	123,11
03/12/2015	62,37	6,81	87,75	54,01	295,35	127,56	mna	mna	3332,97	mna	138,41	136,58
Máximo	850,41	67,81	682,63	658,58	819,56	1671,44	184,79	462,01	240006,80	817,86	422,26	619,66
Mínimo	24,90	6,11	61,48	24,35	32,23	117,96	15,84	62,68	3013,73	62,52	9,59	86,78
Média	207,84	26,39	293,15	207,14	305,81	608,67	84,25	255,37	29221,72	329,58	129,11	247,70
Desvio Padrão	261,88	18,79	172,90	189,86	192,68	450,42	59,65	123,71	64361,90	243,78	118,63	140,79
CV (%)	126,00	71,19	58,98	91,66	63,01	74,00	70,80	48,44	220,25	73,96	91,88	56,84

Nota: MP&M: Meyer-Peter & Muller; E. Mod.: Einstein Modificado; A&W: Ackers e White; E&H: Englund e Hansen, mna: método não se aplica, - : métodos não calculados por falta de parâmetros .

Na tabela 21 os resultados da descarga sólida total calculada por alguns métodos são comparados com os resultados da descarga sólida total medida. Entre os resultados dos métodos, estes apresentaram melhores resultados com resultados iguais ou próximos dos resultados obtidos das medições.

Para uma análise mais precisa na escolha dos métodos que apresentaram os melhores resultados utilizou-se o índice de dispersão (ID), como proposto por Aguirre et al. (2004) apresentado pelas equações 114, 115 e 116. São aceitáveis os métodos que apresentarem ID com valores menores ou iguais a dez. Os métodos serão tanto melhores, quanto mais próximo de zero for o ID.

Na tabela 22 são apresentados o índice de dispersão (ID), fator médio de estimativa (MPF) e erro médio normalizado (MNE) para cada método de cálculo para estimar o transporte de sedimentos da seção do rio Vacacaí Mirim para o período de 2014 a 2015.

Tabela 22 - Índice de dispersão (ID) para os métodos de cálculo do transporte de sedimentos avaliados neste estudo, no Rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca.

Métodos calculados	MNE (%)	MPF	ID
Einstein mod. por Colby e Hembree (1955)	9,42	0,91	0,09
Van Rijn (1984)	41,26	1,86	0,77
Toffaleti (1969)	70,43	2,01	1,42
Karim (1998) *	96,47	1,72	1,66
Colby (1957)	119,65	1,92	2,30
Engelund & Hansen (1967)	124,08	1,92	2,38
Ackers & White (1973)	123,65	1,97	2,44
Laursen (1958)	163,49	2,49	4,07
Meyer-Peter & Müller (1948) *	81,00	7,51	6,08
Yang (1973)	261,06	3,61	9,42
Cheng (2002) *	7212,36	73,12	5273,94

Nota: \* Descarga sólida do leito

Os resultados nos métodos de estimativa de transporte de sedimentos mostram que os métodos mais adequados para a descarga sólida total de sedimentos na seção Vacacaí Mirim – Restinga Seca foram os métodos de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955) com ID = 0,09, Van Rijn (1984) ID = 0,77 e Colby (1957) com ID = 2,30.



Para descarga sólida em suspensão os métodos mais adequados para estimar o transporte de sedimentos foram Toffaleti (1969) com valor de ID = 1,42, Engelund & Hansen (1967) ID = 2,38, Ackers e White (1973) ID = 2,44, Laursen (1958) ID = 4,07 e Yang (1973) ID= 9,42.

Para descarga sólida de leito o métodos que apresentaram melhores resultados foram Karim (1998) com ID = 1,66, Meyer-Peter e Müller (1948) com ID de 6,08.

Scapin (2007) obteve em suas avaliações que nenhum dos métodos de estimativa da descarga de fundo testados, foram capazes de estimar descarga de fundo medida com precisão aceitável, diferenciando-se dos resultados obtidos na atual avaliação em que foi possível avaliar a descarga de fundo.

O método de Cheng (2002) foi o único método dos utilizados que não ficou dentro da faixa do ID. O ID encontrado para a seção de estudo foi 5273,94 não sendo recomendado o uso deste método para estimar a descarga sólida de leito,

O Índice de dispersão (ID) calculado no presente estudo foi comparado com os obtidos anteriormente por Rizzardi (2013) na seção fluviométrica, Scapin (2005) na secção fluviométrica do arroio Cancela, pertencente a bacia hidrográfica do arroio Cadena em Santa Maria-RS e Aguirre-Pe (2004), apresentados seguir na tabela 23:

Tabela 23 - Comparação entre ID calculado, apresentado por Scapin (2005), Rizzardi (2013) e Aguirre-Pe (2004)

Métodos calculados	Índice de Dispersão – ID			
	Calculado	Scapin (2005)	Rizzardi (2013)	Aguirre-Pe (2004)
Einstein mod. por Colby e Hembree (1955)	0,09	0,11	0,07	
Colby (1957)	2,30	0,44	2,04	
Toffaleti (1969)	1,42		3,53	
Meyer-Peter & Müller (1948) *	6,08		7,02	
Ackers & White (1973)	2,44	3,20	238,13	11,79
Karim (1998) *	1,66	3,06	336,05	1,66
Laursen (1958)	4,07		687,33	
Van Rijn (1984)	0,77	9,37	1583,02	
Yang (1973)	9,42	2,23	18101,8	
Engelund & Hansen (1967)	2,38	15,38	318538,2	1,33
Cheng (2002) *	8025,73	562,26	84778390,5	25,65

Nota: \* Descarga sólida de leito

Para efeito de comparação dos resultados obtidos, nos métodos de estimativa de cálculo de transporte de sedimentos utilizando o índice de dispersão segundo Aguirre (2004), observou-se que o método de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955) apresentou resultados aproximados com os dados medidos, sendo o melhor resultado e não obteve diferença de valores tanto para Scapin (2005), Rizzardi (2013) e para o estudo atual. Este resultado pode ser explicado pelo método ser o mais completo e utilizar dados medidos, o que permite aproximar os resultados de descarga medida com a descarga estimada.

O método de Colby (1957), utiliza dados medidos da concentração de sedimentos em suspensão. Os resultados dos estudos obtidos na seção fluviométrica de Restinga Seca foram idênticos quanto aos valores do índice de dispersão para Rizzardi (2013)  $ID= 2,04$  e atual estudo  $ID= 2,30$ , diferenciando do  $ID=0,44$  obtido por Scapin (2005), que pode ser explicado por ser uma bacia urbana, com características hidráulicas e geométricas diferentes da bacia do rio Vacacaí Mirim.

O método de Toffaleti (1969), que é utilizado para estimar a descarga sólida em suspensão apresentou  $ID=1,42$  para o atual estudo e  $ID=3,53$  para Rizzardi (2013), onde estes resultados estão dentro da faixa aceita pelo ID (valores de ID menores ou igual a 10) podendo ser o método utilizado para estimar o transporte de sedimentos em suspensão.

O método de Meyer-Peter e Müller (1948) foi o método para estimar a descarga sólida de leito que apresentou o índice para o estudo atual de  $ID = 6,08$  e para Rizzardi (2013) foi de  $ID = 7,02$ , sendo permitido o uso desse método para estimar o transporte de sedimentos de leito devido ao índice estar dentro da faixa de aceitação para o uso do método.

O método de Karim (1998) apresentou  $ID = 1,66$  para o atual estudo sendo igual ao obtido por Aguirre (2004) e assemelhando-se ao ID obtido por Scapin (2005) no seu trabalho realizado no Arroio Cancela, diferenciando-se do resultado encontrado por Rizzardi (2013)  $ID = 336,05$ .

Os métodos de Ackers e White (1973), Yang (1973) e Van Rijn (1984) apresentaram o ID na faixa aceitável nos estudos realizados por Scapin (2005) e no atual estudo.

O método de Engelund e Hansen (1967) apresentou  $ID = 2,38$  para o atual estudo assim como para Aguirre (2004) com  $ID = 1,33$ . Para Scapin (2005) o  $ID = 15,38$  indica que o método não pode ser utilizado para a seção e rio utilizados no seu estudo.

O método de Cheng (2002) foi o único que não se enquadra para utilização para avaliação pelo Índice de dispersão, para Aguirre (2004), Scapin (2005), Rizzardi (2013) e no estudo atual.

Devem-se observar todos os métodos a serem utilizados na seção, pois os resultados obtidos em cada um dos métodos são diferentes um do outro. Os resultados das estimativas indiretas do transporte de sedimentos podem ser subestimados ou superestimados, devido a diferentes parâmetros hidráulicos, geométricos utilizados em cada método.

Scapin (2007) em seu estudo realizado em uma bacia urbana em Santa Maria concluiu que os resultados conflitantes nas diversas avaliações mostram que não é possível simplesmente aplicar um método de cálculo qualquer para uma determinada seção de rio.

Entre os métodos para estimar o transporte de sedimentos avaliados no atual estudo pode-se afirmar que o método de Einstein mod. por Colby e Hembree (1955) e Van Rijn (1984) apresentaram as melhores respostas e são os mais indicados para serem utilizados na seção do rio Vacacaí Mirim em Restinga Sêca.

Nos estudos de Scapin(2005), Rizzardi (2013) e no atual estudo o método de Einstein mod. por Colby e Hembree (1955) foi o que apresentou melhor ID, sendo o mais recomendado para ser utilizado para diferentes rios.



## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente estudo foi avaliada a variação temporal do transporte de sedimentos na seção transversal do rio Vacacai Mirim, localizada no município de Restinga Sêca e alguns métodos utilizados para o cálculo do transporte de sedimentos para utilização no Rio Vacacai Mirim.

A avaliação quantitativa da água e dos sedimentos foi realizada após eventos de precipitação, possibilitando a avaliação da vazão, da concentração dos sedimentos, assim como das descargas sólidas.

A avaliação temporal do transporte de sedimentos permitiu observar que a variação de  $C_{ss}$ ,  $Q_{ss}$  e  $Q_{st}$  entre 2007 e 2015 é dependente de diversos fatores como época do ano, uso e ocupação do solo, umidade antecedente, práticas conservacionistas, respeito a vegetação de APPs, dentre outros.

No período de 2014 a 2015 o material de arraste de fundo apresentou diâmetros característicos menores que do material de leito da seção, onde descarga sólida total em suspensão predominou representando 99,90 % da descarga sólida total.

No período de 2007 a 2015 a menor e maior descarga líquida ocorreram no período sem cultivo de arroz, indicando que a variação da cota e vazão são influenciadas pela ocorrência de grandes volumes de chuva.

As menores vazões repetiram-se em períodos semelhantes nos anos de 2007, 2009, 2010 e 2011, nos meses de outubro. Em 2012 as menores descargas líquidas foram observadas no período de fevereiro a junho.

A  $C_{SS}$  apresentou o mesmo comportamento, quanto á tendência de aumento de  $C_{SS}$  em relação à vazão anos de 2007 a 2010 e 2014 a 2015. As menores  $C_{ss}$  observadas apresentam-se, ao longo do monitoramento, nos meses de março, abril, junho, julho, outubro, novembro, já os picos foram obtidos no mês de outubro, com exceção para a registrada em 01/06/2012.

As menores  $C_{ss}$  observadas apresentam-se, ao longo do monitoramento, nos meses de maio e junho. Destaca-se que o comportamento da  $C_{ss}$  segue, analogamente, o comportamento da descarga líquida ao longo do monitoramento, ou seja, a elevação da  $C_{ss}$  tem relação direta com a vazão.

Nos períodos de 2007 a 2010 e 2011 a 2012 as curvas de descarga total de sedimento se assemelham quanto ao seu comportamento de crescimento, diferenciando-se da curva da QsT do período de 2014 a 2015. A curva de QsT de 2007 a 2010 apresenta maior faixa de variação entre os três períodos avaliados, devido ao maior período de monitoramento.

A maior quantidade de sedimentos para a mesma vazão pode ser explicado pelo excesso de chuvas do período avaliado e pelas práticas de manejo, provocando maior perda de solo na bacia.

As menores Qss e Qst foram observadas nos meses de março, abril, junho, julho, outubro, novembro, já os picos foram obtidos no mês de outubro.

Os métodos mais adequados para estimar a descarga sólida total na seção foram os métodos de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955), Van Rijn (1984) e Colby (1957). Para descarga sólida em suspensão os métodos mais adequados foram Toffaleti (1969), Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973), Laursen (1958) e Yang (1973) e para descarga sólida de leito os métodos foram Karim (1998) e Meyer-Peter e Müller (1948).

Este trabalho contribuiu para o conhecimento da variação temporal do transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica rural, bem como os métodos mais adequados para estimar a descarga sólida na seção Vacacai Mirim, Restinga Sêca.

Recomenda-se a continuidade do trabalho na seção e em outros pontos do rio Vacacáí Mirim, visando obter maiores informações para obtenção de uma série longa de dados, para futuras simulações sedimentológicas na bacia hidrográfica.

## REFERÊNCIAS

ALTHOFF, D.A.; KLEVESTON, R. Sólidos suspensos e perdas de nutrientes no preparo do solo para o arroz irrigado. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.9, n.2, p.44- 46, 1996.

BARROS, C. A. P. D. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), 2012.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F., **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010.

BRAGA, C. C.; ROCHA, H. M.; CABRAL, J. B. P. Análise da quantidade de descarga sólida total dos principais afluentes da bacia hidrográfica do reservatório da UHE Barra dos Coqueiros. **Revista Geonorte**, v.3, n.4, p. 495-505, 2012.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do parametro de propagação de sedimentos do modelo de williams (1975) na bacia do rio vacacaí-mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. 2004.

CHALOV, S. R., JARSJÖ, J., KASIMOV, N. S., ROMANCHENKO, A. O., PIETROŃ, J., THORSLUND, J., PROMAKHOVA, E. V. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 2, p. 663-680, 2015.

CHELLA, M. R.; FERNANDES, C. V.; FERMIANO, G. A.; FILL, H. D.; SANTOS, I. Avaliação do transporte de sedimentos no rio Barigui. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 3, p. 105-111, 2005.

CRISPIM, D. L., ISMAEL, L. L., DE SOUSA, T. M. I., GARRIDO, J. W. A., & DE QUEIROZ, M. M. F. Transporte e caracterização de sedimentos de fundo no rio Piranhas em uma seção de controle próximo à sede do município de pombal-PB. **HOLOS**, v. 3, p. 93-101, 2015.

DANG, T. H., COYNEL, A., ORANGE, D., BLANC, G., ETCHEBER, H., LE, L. A. Long-term monitoring (1960–2008) of the river-sediment transport in the Red River Watershed (Vietnam): temporal variability and dam-reservoir impact. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 20, p. 4654-4664, 2010.

DEPINÉ, H.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V.; SILVA, M. Transporte de sedimentos em suspensão em áreas agrícolas em diferentes escalas espaciais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, p. 97-104, 2011.

DIDONÉ, E. J.. **Erosão bruta e produção de sedimentos em bacia hidrográfica sob plantio direto no planalto do Rio Grande do Sul...**Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. 2013.

DING, W., EL KATEB, H. Annual discharge and sediment load variation in Jialing River during the past 50 years. **Journal of Mountain Science**, v. 8, n. 5, p. 664-676, 2011.

DURAFOUR, M., JARNO, A., LE BOT, S., LAFITE, R., MARIN, F. Bed load transport for heterogeneous sediments. **Environmental Fluid Mechanics**, p. 1-21, 2014.

EUCLYDES, H.P, FERREIRA, P.A., RUBERT, O.A.V., SANTOS, R.M. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 81-105, 2001.

ESPÍNDOLA, E.L.G. A bacia hidrográfica do córrego monjolinho, **USP- Escola de Engenharia de São Carlos: Rima**, 2000.

FERREIRA, P. M. L.; SOUSA, T. M. I.; GARRIDO, J. W. A.; QUEIROZ, M. M. F.; ISMAEL, L. L. Transporte de Nutrientes e sólidos suspensos na bacia do Rio Piancó Piranhas Açu. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 4, p. 40-49, 2013.

FILL, H. D.; SANTOS, I.; FERNANDES, C. V. S.; GOMES, J.; DZIEDZIC, M.; KISHI, R. T. (2002). **PEN-04 – Modelagem hidrológica e ambiental de bacias hidrográficas: relatório técnico**. Curitiba: CEHPAR.

LOWRANCE, R.; DABNEY, S. & SCHULTZ, R. **Improving soil and water quality with conservation buffers**. J. Soil Water Conserv., 57:36-43, 2002.



LELI, I. T.; STEVAUX, J. C.; NÓBREGA, M. T. D.; SOUZA, E. E. D. F. Variabilidade temporal no transporte de sedimentos no rio Ivaí-Paraná (1977-2007). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 619-628, 2011.

LIU, C., HE, Y., DES WALLING, E., & WANG, J. Changes in the sediment load of the Lancang-Mekong River over the period 1965–2003. **Science China Technological Sciences**, v. 56, n. 4, p. 843-852, 2013.

MACHADO, S. L. O.; ENIO, M.; RIGHES, M. A. A., VILLA, R. C. S. C. C., & CAMARGO, E. R.. Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial do arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, 2006.

MATOS, A. J. S., PIOLTINE, A., MAUAD, F. F., & BARBOSA, A. A....Metodologia para a caracterização do coeficiente de Manning variando na seção transversal e ao longo do canal estudo de caso bacia do Alto Sapucaí-MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 21-28, 2011.

MEDEIROS, P. H. A., DE ARAÚJO, J. C., MAMEDE, G. L., CREUTZFELDT, B., GÜNTNER, A., & BRONSTERT, A.. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 12, p. 1938-1948, 2014.

MEGAHAN, W. F. Scale considerations and Detectability of Sedimentary Cumulative Watershed Effects. Technical Bulletin n. 776, Research Triangle Park, N.C.: **National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement**, Inc., 1999, 358p.

MINELLA, J.P.; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M.; SANTOS, D.R. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1637-1646, 2007.

MOREHEAD M.D., SYVITSKI J.P.M., HUTTON E.W., PECKHAM S.D. **Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins**. *Global and Planetary Change*, **39**(1-2):95-110. 2003.

NETO, J. S. D. A.. **DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO DO SISTEMA GUAÍBA, RS, E SUA VARIABILIDADE TEMPORAL..** Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011

PAIM, J. B. . **Avaliação do potencial de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Piçarras utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Dissertação.(Dissertação em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade do Vale do Itajaí,. 2012.

PAIVA, J. B. D.,. **Avaliação dos modelos matemáticos de calculo do transporte de sedimentos em rios.** Tese (Doutorado em Engenharia). (Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

PAIVA, J. B. D. **Relatório final do projeto:** Caracterização Hidrossedimentométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim, com Base em Dados Medidos de Vazão e Sedimentos. Edital MCT/CNPq 15/2007 - Universal - Faixa B.. Fevereiro de 2011.

PAIVA, J. B. D.; NOAL, A. Á.; ALVES, C. B.; RIZZARDI, A. S.; SCHONS, C. A.; CECHIN, G.; LIBRAGA, J. Caracterização hidrossedimentométrica da bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, com base em dados medidos de vazão e sedimentos. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013.

PITILIN, G. R.; PIMENTA, P. C.; TEIXEIRA, G. R. W.; BEIER, E. V.; POLETO, C. Descarga sólida de sedimentos em suspensão na bacia do rio Toledo. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013.

PITLICK, JOHN. Response and recovery of a subalpine stream following a catastrophic flood. **Geological Society of America Bulletin**, v. 105, n. 5, p. 657-670, 1993.

REID, I.; BARTHURST, J. C.; CARLING, P. A.; WALLING, D. E.; WEBB, B. Sediment Erosion,Transport and Deposition. In: **Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management.** New York: John Wiley & Sons, p. 95-135. 1997.

RIZZARDI, A. **Avaliação e caracterização dos sedimentos transportados no rio vacacaí mirim.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. 2013.

ROVIRA, A., BATALLA, R.J.. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin The Lower Tordera (NE SPAIN). **Geomorphology**, 79, 58-71. 2006.

SANTOS, R. O.; SCUDELARI, A. C.; CUNHA, C. L. N.; RIGHETTO, A. M. Avaliação da Produção e Aporte de Sedimentos para o Rio Potengi, RN. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 149-163, 2013.

SCAPIN, J . **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria–RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. 2005

SCAPIN, J., PAIVA, J., & BELING, F. A.. Avaliação de métodos de cálculo do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 14, p. 05-21, 2007.

SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A., C.; DOS SANTOS, I..**Avaliação do ARCMUSLE para estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do alto rio Negro**, região sul brasileira-doi: 10.4025/bolgeogr.v31i2. 13367. *Boletim de Geografia*, 31(2), 131-141

SEEGER, M.; ERREA, M. P.; BEGUERÍA, S.; ARNÁEZ, J.; MARTÍ, C.; GARCÍA-RUIZ, J. M. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factor for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrennes. **Journal of Hydrology**, v. 288, p. 299 – 311. 2004

SHAH-FAIRBANK, S. C., JULIEN, P. Y., & BAIRD, D. C. SHAH-FAIRBANK, SEEMA C.; JULIEN, PIERRE Y.; BAIRD, DREW C. Total sediment load from SEMEP using depth-integrated concentration measurements. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 12, p. 1606-1614, 2011.

SHAH-FAIRBANK, S. C., JULIEN, P. Y.. Sediment load calculations from point measurements in sand-bed rivers. **International Journal of Sediment Research**, v. 30, n. 1, p. 1-12, 2015.

TARAZÓN, J. A., & BATALLA, R. J. Dominant discharges for suspended sediment transport in a highly active Pyrenean river. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 12, p. 2019-2030, 2014.

TSAI, C. T., TSAI, C. H., WENG, C. H., BAIR, J. J., CHEN, C. N. Calculation of bed load based on the measured data of suspended load. **Paddy and Water Environment**, v. 8, n. 4, p. 371-384, 2010.

VALENTIN, G., ZHANG, X. B., HE, X. B., TANG, Q., & ZHOU, P. . Principal denudation processes and their contribution to fluvial suspended sediment yields in the Upper Yangtze River Basin and Volga River Basin. **Journal of Mountain Science**, v. 12, n. 1, p. 101-122, 2015.

VANZELA, L. S.; DE SOUZA, R. A.; PITARO, F. A. M.; FREITAS, P. A.; SANCHES, A. C. Influência da ocupação do solo e do excedente hídrico sobre a vazão e transporte de sedimentos. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 181- 191, 2012.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, v. 111, p. 89-106, 1989.

YANG, S. Q., & LIM, S. Y. Total load transport formula for flow in alluvial channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 1, p. 68-72, 2003.

ZABALETA, A.; MARTÍNEZ, M.; URIARTE, J. A.; ANTIGÜEDAD, I. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. **Catena**, v. 71, n. 1, p. 179-190, 2007.