**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Valoração econômica do serviço de redução de sedimentos das
florestas da bacia hidrográfica do Canal do Panamá**

Eustorgio Jaén Núñez

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2011**

Eustorgio Jaén Núñez
Engenheiro Florestal

**Valoração econômica do serviço de redução de sedimentos das florestas da bacia
hidrográfica do Canal do Panamá**

Orientador:
Prof. Dr. **RICARDO SHIROTA**

Tese apresentada, para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

Piracicaba
2011

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Jaén Núñez, Eustorgio

Valoração econômica do serviço de redução de sedimentos das florestas da bacia hidrográfica do Canal do Panamá / Eustorgio Jaén Núñez. - - Piracicaba, 2011.
142 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Bacia hidrográfica 2. Canal do Panamá 3. Custo de operações 4. Deposição de sedimentos 5. Florestas - Impactos físicos 6. Matas ciliares 7. Sedimentologia 8. Valor (Economia) I. Título

CDD 333.91
J22v

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

*A minha esposa Isabel Cristina pela sua
compreensão e paciência*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por dar-me a saúde e fortaleza para realizar este projeto de doutorado, e para permanecer longe da família.

Ao Professor Dr. Ricardo Shirota pela sua orientação e conselhos na elaboração deste trabalho de tese e pela sua amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e o Governo da República Federativa do Brasil pelo apoio financeiro brindado, o qual possibilitou a minha permanência durante todo este período e a conclusão do doutorado.

À Autoridad Nacional del Ambiente por confiar em mim e me conceder a oportunidade de crescer profissionalmente.

À Autoridade del Canal de Panamá por conceder-me toda a informação requerida para desenvolver este estudo.

À Maria Aparecida Maielli, Secretaria do Programa de Pós-graduação em Economia Aplicada, por toda sua atenção e colaboração, que para mim foram fundamentais para concretizar o meu doutorado.

Ao Professor Rogério Costa Campos do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Pelotas, pela sua colaboração no estudo de classes de solo das microbacias analisadas.

A todos os alunos, professores e pessoal administrativo do Programa de Pós-graduação em Economia Aplicada pela acolhida durante estes dois e meio anos.

Aos meus amigos Alexandre Hattner Menegário e Jerônimo Alves dos Santos pela sua orientação, amizade e permanente disposição a ajudar-me.

Aos meus companheiros de moradia Enéas Ricardo Konzen, Wellington Ferreira Campos e Ezio Nalin de Paulo pela acolhida e convivência.

SUMARIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	23
2.1 Características da economia panamenha	23
2.2 Canal do Panamá.....	26
2.2.1 Antecedentes históricos	26
2.2.2 Importância para o comercio internacional.....	28
2.2.3 Impacto na economia panamenha	30
2.2.4 Operação e geografia.....	33
2.3 Caracterização da área de estudo	37
2.3.1 Microbacia do rio Chagres.....	37
2.3.2 Microbacia do rio Pequení.....	39
2.3.3 Microbacia do rio Boquerón.....	41
2.3.4 Microbacia do rio Gatún	42
2.3.5 Microbacia do rio Trinidad	44
2.3.6 Microbacia do rio Cirí Grande.....	46
2.3.7 Microbacia do rio Caño Quebrado.....	48
2.4 Processo de sedimentação na bacia do Canal	50
2.4.1 Impacto da sedimentação nos custos de operação do Canal	56
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	59
3.1 Fatores naturais e características da microbacia que regulam o processo escoamento superficial e transporte de sedimentos.....	59
3.2 Bens e serviços dos ecossistemas florestais	62
3.3 Efeitos da cobertura florestal no controle de erosão e sedimentos	64
3.4 Valores econômicos associados a ecossistemas florestais	68
4 FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS.....	73

4.1	Metodologias de valoração de recursos naturais e ambientais	73
4.2	Valor econômico do impacto das florestas na redução de sedimentos	76
5	METODOLOGIA	81
5.1	Metodologia de valoração econômica.....	81
5.1.1	Impacto físico da cobertura florestal sobre a produção de sedimentos	85
5.1.2	Valor econômico do serviço ambiental da floresta na redução de sedimentos	86
5.2	Fonte e característica da informação utilizada.....	86
6	RESULTADOS.....	97
6.1	Impacto da cobertura florestal e de outras variáveis sobre a produção de sedimentos na bacia do Canal do Panamá.....	97
6.2	Valor econômico do serviço ambiental por redução de sedimentos	105
7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	109
8	CONCLUSÕES.....	115
	REFERENCIAS	119
	ANEXOS.....	127

RESUMO

Valoração econômica do impacto das florestas da bacia hidrográfica do Canal do Panamá na redução de sedimentos

O processo de sedimentação e assoreamento reduz a profundidade e a capacidade dos lagos de armazenamento de água do Canal do Panamá, obrigando a realizar dragagens periódicas que aumentam os custos de operação. Esses processos são acelerados pela perda de cobertura florestal na bacia. O presente estudo teve por objetivo estimar o valor econômico associado à redução de sedimentos na floresta da bacia do Canal, através do método de custo evitado de dragagem. O efeito físico da cobertura florestal sobre a redução de sedimentos foi estimado a través de regressão linear de dados biofísicos de sete microbacias que dispõem de medições de produção de sedimentos: Chagres, Pequení, Boquerón, Gatún, Trinidad, Cirí Grande e Caño Quebrado. Os resultados mostram que cada hectare de floresta nesta área reduz em $14,76 \text{ t.ano}^{-1}$ de sedimentos em suspensão. Adicionando sedimentos de fundo isso corresponde a $14,32 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e a um valor econômico de USD 197,40 por hectare por ano. Concluiu-se que as florestas contribuem significativamente para mitigar o processo de assoreamento dos lagos de armazenamento de água para o funcionamento do Canal do Panamá, e essa contribuição pode ser valorada em USD 39.640.091 por ano, para toda a floresta da bacia.

Palavras-chave: Sedimentação; Canal do Panamá; Cobertura florestal; Microbacias; Custo evitado

ABSTRACT

Economic valuation of the impact of the Panama Canal basin forests in sediment reduction

Sedimentation and siltation reduce the lakes' depth and capacity to hold water in the Panama Canal, requiring periodic dredging which increases the operation costs. These processes are accelerated by the loss of forests that cover the basin. This study's objective is to estimate the economic value associated with reduction of sediments in the Canal basin, based on the method of avoided dredging cost. The physical effect of forest on sediment reduction was estimated through linear regression of biophysical data for seven watersheds that have measurements of sediments yield: Chagres, Pequení, Boquerón, Gatún, Trinidad, Cirí Grande and Caño Quebrado. These results shows that each hectare of forest in this area reduces the sediments in suspension. By adding sediments from the bottom of the riverbed, this corresponds to $14.32 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ and to an economic value of USD 197.40 per hectare per year. It was concluded that forests contribute significantly to mitigate the process of siltation of lakes water storage for the operation of the Panama Canal, and this contribution may be valued at USD 39,640,091 per year for the entire basin forest.

Keywords: Sedimentation; Panama Canal; Forest covering; Watersheds; Avoided Cost

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do Produto Interno Bruto anual do Panamá, a preços constantes de 1996, em bilhões de dólares - 1999 a 2010	23
Figura 2 - Trabalhos de construção do Canal do Panamá – 1904 -1914	28
Figura 3 – Evolução do movimento de carga comercial em toneladas CP/SUAB e número de trânsitos de navios pelo Canal do Panamá, no período 1915-2010	29
Figura 4 – Geração de rendas diretas pelo Canal do Panamá, a preços correntes, no período 2000 – 2010	30
Figura 5 - Conglomerado e sistema econômico derivado das operações do Canal.....	32
Figura 6 – Ilustração do trajeto percorrido pelos navios que transitam o Canal do Panamá	33
Figura 7 - Mapa da rede hidrográfica da bacia do Canal de Panamá	34
Figura 8 - Precipitação média anual, em milímetros, na bacia hidrográfica do Canal do Panamá, entre 1999 e 2010	35
Figura 9 - Mapa temático da microbacia Chagres para os anos 1999, 2005 e 2010 ...	38
Figura 10 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Chagres, em percentual, no período entre 1999 e 2010.....	39
Figura 11 - Mapa temático da microbacia Pequení para os anos 1999, 2005 e 2010....	40
Figura 12 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Pequení, em percentual, no período entre 1999 e 2010.....	40
Figura 13 - Mapa temático da microbacia Boquerón para os anos 1999, 2005 e 2010 .	41
Figura 14 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Boquerón, em percentual, no período entre 1999 e 2010.....	42
Figura 15 - Mapa temático da microbacia do rio Gatún para os anos 1999, 2005 e 2010	43
Figura 16 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Gatún, em percentual, no período entre 1999 e 2010	44
Figura 17 - Mapa temático da microbacia do rio Trinidad para os anos 1999, 2005 e 2010	45

Figura 18 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Trinidad, em porcentual, no período entre 1999 e 2010	45
Figura 19 - Mapa temático da microbacia do rio Cirí Grande para os anos 1999, 2005 e 2010	47
Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).	47
Figura 20 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Cirí Grande, em porcentual, no período entre 1999 e 2010	47
Figura 21 - Mapa temático da microbacia do rio Caño Quebrado para os anos 1999, 2005 e 2010	49
Figura 22 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Caño Quebrado, em porcentual, no período entre 1999 e 2010	49
Figura 23 - Produção media anual de sedimentos para diferentes usos de solo na zona de Bathurst (New South Wales, Austrália)	67
Figura 24 - Categorias do valor econômico de um ecossistema florestal	69
Figura 25 - Ilustração gráfica do valor dos serviços ambientais	70
Figura 26 – Classificação das metodologias de valoração econômica de bens e serviços ambientais de acordo com a origem da informação usada na estimacão do valor monetário	75
Figura 27 – Variação da cobertura florestal e produção de sedimentos durante o período 1999-2009, usando valores médios anuais do conjunto de microbacias.....	98
Figura 28 - Comportamento precipitação e produção de sedimentos durante o período 1999-2009, usando valores médios anuais do conjunto de microbacias	99
Figura 29 - Estimativa de sedimentos evitados pela cobertura florestal nas sete microbacias estudadas. Período 1999-2009.....	103
Figura 30 - Estimativas da produção anual de sedimentos associada à perda de cobertura florestal nas sete microbacias estudadas. Período 1999-2009..	104
Figura 31 – Ilustração gráfica do custo evitado (poupança) associado ao serviço ambiental de redução da produção de sedimentos da floresta da bacia do Canal do Panamá para cenários de cobertura florestal atual	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Evolução do Produto Interno Bruto anual das principais atividades selecionadas da economia panamenha, a preços constantes de 1996, em milhões de dólares, no período entre 1999 e 2010.....	24
Tabela 2 –	Evolução de indicadores selecionados do Mercado de Trabalho panamenho, no período entre 1999 e 2009	25
Tabela 3 -	Superfície por tipo de uso do solo na bacia hidrográfica do Canal do Panamá, em ha e porcentual - 2003.....	36
Tabela 4 -	Dados médios das sete microbacias analisadas, 1999 a 2009	50
Tabela 5 –	Resumo das estimativas da taxa de sedimentação e perda de capacidade de armazenamento de água, obtidas pelos diversos estudos realizados para o Lago Alhajuela	55
Tabela 6 -	Volume dragado no período 1990-2009. E estimativas do custo de dragagem anual para esse período, usando um custo unitário de USD 13,78 por m ³ de material dragado.....	58
Tabela 7 -	Principais serviços e funções que desempenham os ecossistemas naturais	64
Tabela 8 -	Erosão do solo, escoamento superficial e precipitação pluviométrica nos sistemas de pastagem e floresta primária na região de Apiaú, Roraima, Brasil. Agosto de 1988 a fevereiro de 1992	66
Tabela 9 -	Valores de escoamento superficial e erosão para diferentes usos da terra no trópico em diferentes sítios do mundo	68
Tabela 10 -	Metodologias de valoração econômica de recursos naturais segundo o tipo de valor a ser calculado	76
Tabela 11 -	Resumo do valor econômico das florestas no controle da erosão e sedimentos, encontrado por diversos estudos.....	79
Tabela 12 -	Registros da produção anual de sedimentos, em t.km ⁻² , para as sete microbacias, no período entre 1999 e 2009.....	88
Tabela 13 -	Registros da precipitação anual, em milímetros, para as sete microbacias analisadas, no período entre 1999 e 2010.....	89

Tabela 14 – Estimativa da cobertura florestal para as sete microbacias analisadas, em porcentagem da área, expressa como porcentagem, para o período 1999-2010	90
Tabela 15 - Dados da área com medição hidrométrica, declividade média, densidade de drenagem, comprimento do leito principal, fator de forma e estrutura de drenagem das sete microbacias.....	92
Tabela 16 - Registros do escoamento superficial total anual em milhões de metros cúbicos (MM ³) para as sete microbacias analisadas, de 1999 a 2009	93
Tabela 17 - Registros da vazão média anual em m ³ .s ⁻¹ , para as sete microbacias, de 1999 a 2009	94
Tabela 18 – Estimativas do custo dragagem por metro cúbico de material. Atualizados ao ano 2010 usando o Índice de Preço industrial e de importação	95
Tabela 19 - Resultado da regressão aplicada ao painel de dados das sete microbacias	102
Tabela 20 – Estimativas de impactos da cobertura florestal na redução da produção de sedimentos para cada uma das microbacias estudadas	106
Tabela 21 - Estimativas do aporte atual das classes de uso do solo à produção média anual de sedimentos nas sete microbacias analisadas, para o período 1999-2009	111
Tabela 22 – Média do Valor Econômico Total - VET estimado para os parques nacionais Chagres, Soberania e Campana na bacia do Canal do Panamá em USD por hectare.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	- Autoridad del Canal de Panamá
ANAM	- Autoridad Nacional del Ambiente
CICH	- Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá
CGR	- Contraloría General de la República
CP/SUAP	- Canal de Panamá Sistema Universal de Arqueo de Buques
FAO	- Food and Agriculture Organization of the United Nations
ha	- Hectares
IPC	- Índice de Preços ao Consumidor
km	- Quilômetros
km.km ⁻²	- Quilômetros por quilômetro quadrado
km ²	- Quilômetros quadrados
MEF	- Ministerio de Economía y Finanzas
m	- Metros
m ³	- Metros cúbicos
m ³ .ano ⁻¹	- Metros cúbicos por ano
m ³ .h ⁻¹	- Metros cúbicos por hectare
m ³ .km ⁻²	- Metros cúbicos por quilômetro quadrado
m ³ .s ⁻¹	- Metros cúbicos por segundo
msnm	- Metros acima do nível do mar
mm	- Milímetros
mm.ano ⁻¹	- Milímetros por ano
MM ³	- Milhões de metros cúbicos
MM ³ .ano ⁻¹	- Milhões de metros cúbicos por ano
mg.l ⁻¹	- Miligramas por litro
PCC	- Panamá Canal Commission
PMCC	- Programa de Monitoreo de la Cuenca del Canal
PMCSS	- Programa de medición del caudal de sedimentos suspendidos

PIB	- Produto Interno Bruto
SEC	- Sistema Econômico do Canal
t	- Toneladas
t.ha ⁻¹	- Toneladas por hectare
t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹	- Toneladas por hectare por ano
t.km ⁻²	- Toneladas por quilômetro quadrado
t.km ⁻² .ano ⁻¹	- Toneladas por quilômetro quadrado por ano
t.m ⁻³	- Toneladas por metro cúbico

1 INTRODUÇÃO

Historicamente a nação panamenha tem estado associada à sua posição geográfica estratégica e ao serviço de trânsito entre oceanos. Com o início das operações do Canal do Panamá em 1914, cresceu em importância a rota comercial através do istmo, conferindo ao país maior importância comercial e estratégica.

Mundialmente, observa-se uma acelerada evolução nos meios pelos quais são realizadas as trocas comerciais marítimas. Nesse âmbito, o Canal do Panamá permite otimizar o transporte marítimo mundial, encurtando a distância entre países produtores e consumidores. Como resultado dessa evolução, o volume de tráfego que utiliza o Canal tem aumentado rapidamente com os usuários esperando transitar de forma rápida, confiável, segura e barata, e essas dimensões do tráfego vem determinar a qualidade do serviço oferecido pelo Canal do Panamá (AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ - ACP, 2006a).

Atualmente transitam pelo Canal cerca de 14.000 navios por ano e 300 milhões de toneladas CP/SUAP¹. Esse fluxo comercial é essencial para a economia panamenha pela geração de rendas diretas e indiretas, através do seu impacto sobre os diversos setores produtivos. Dessa forma, age como impulsor da economia panamenha contribuindo com 78% da atividade econômica nacional e 75% do total das gerações de divisas (INTRACORP; ASESORES ESTRATEGICOS, 2006).

Para seu funcionamento, o Canal utiliza água da sua bacia de duas formas principais: para a navegação e para as operações de exclusagem, utilizando cerca de 200.000 m³ por cada navio que transita. No entanto, mudanças no uso do solo da bacia têm acelerado o processo de sedimentação e assoreamento dos lagos de armazenamento de água do Canal, gerando dois problemas concretos: (i) redução da capacidade dos lagos para acumular a água necessária para a operação do Canal, especialmente em períodos de secas; e (ii) diminuição da profundidade do Lago Gatún, dificultando ou mesmo impedindo a passagem dos navios. Isso obriga à realizar

¹ Uma tonelada CP/SUAB (Canal de Panamá Sistema Universal de Arqueo de Buques) é uma medida de volume que equivale aproximadamente a 2,83 metros cúbicos de espaço de carga.

dragagens periódicas para evitar riscos de navegação nesta rota, aumentando os custos de operação do Canal do Panamá.

De acordo com ACP (2010), a partir de 1931, vários estudos têm sido realizados para determinar os níveis de assoreamento e perda de capacidade de armazenamento de água dos reservatórios do Canal: Kellog (1931), Wadsworth (1978), Larson (1979), Alvarado (1985), Tutzauer (1990), Panamá Canal Comission - PCC (1997) e ACP (2010). As taxas de sedimentação encontradas por esses pesquisadores para o Lago Alhajuela variam entre 0,056 e 4,332 milhões de metros cúbicos (mm^3) por ano. Neste contexto, Wadsworth (1978), Alvarado (1985) como Larson (1979) consideram a perda da cobertura florestal um fator importante que favorece o processo de assoreamento dos reservatórios do Canal, mas os seus objetivos não eram determinar uma relação entre as duas variáveis.

A perda de solo por erosão hídrica e a consequente produção de sedimentos são afetadas por características e processos naturais como chuvas, erodibilidade do solo, comprimento e grau do declive do terreno, cobertura vegetal, entre outras; e acelerada por atividades humanas. Assim, reconhecendo a cobertura florestal como uma das variáveis que influi no processo de produção de sedimentos, o presente estudo tem como objetivo valorar economicamente o serviço ambiental que desempenham as florestas da bacia hidrográfica do Canal do Panamá, na redução do processo de produção de sedimentos e assoreamento dos lagos de armazenamento de água. Especificamente pretende-se:

- a) estimar o impacto físico da cobertura florestal na redução da produção de sedimentos na bacia do Canal do Panamá mediante a análise estatística de dados de sedimentos produzidos, mudanças na cobertura florestal, precipitação e outras variáveis, para um conjunto de sete microbacias e um horizonte de tempo de onze anos; e,
- b) calcular o valor econômico que poderia ser atribuído às florestas da bacia do Canal do Panamá, pelo serviço de redução de sedimentos que desempenham, a partir da sua relação com a redução de atividades de dragagem.

Conhecer o valor econômico desse serviço ambiental da floresta, possibilitaria tomar decisões mais acertadas sobre a aplicação de políticas e programas de conservação florestal dirigidos para reduzir ou manter as atuais taxas de produção de sedimentos. Além, permitiria avaliar a efetividade de programas e projetos que atualmente estão sendo desenvolvidos na bacia do Canal do Panamá com esse fim.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

2.1 Características da economia panamenha

A economia panamenha baseia-se principalmente no aporte que gera o setor serviços que inclui o Canal do Panamá, o Centro Bancário com 92 bancos estabelecidos, de capital estrangeiro e nacional; a Zona Franca de Comercio Internacional; grandes companhias de seguros; portos internacionais de carga e descarga de mercadorias; registro de marinha mercante à nível mundial; telecomunicações e um setor de turismo em franco desenvolvimento (MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS - MEF, 2004, 2011).

Nos últimos vinte anos, o Panamá tem experimentado muitas mudanças, principalmente a partir de 1990 com o processo de privatização de empresas públicas de serviços, que tem provocado significativas inovações especialmente no âmbito das telecomunicações, e com a reversão do Canal a mãos panamenhas em dezembro de 1999. Assim, a economia panamenha mantém uma dinâmica de crescimento sustentado que se reflete no incremento de todas as categorias de atividade econômica.

Figura 1 – Evolução do Produto Interno Bruto anual do Panamá, a preços constantes de 1996, em bilhões de dólares - 1999 a 2010

Fonte: CGR (2011a).

A partir de 2003, a economia do Panamá vem registrando bom desempenho graças à produção de bens e serviços, atingindo o seu melhor crescimento do PIB em 2007, com 12,11 % em relação ao ano anterior. Para 2010, em dados absolutos, o PIB registrou o valor de USD 20.862,9 milhões, que correspondem a um incremento de USD 1.448,8 milhões (7,46 %) em relação a 2009.

Em termos gerais, as atividades relacionadas com o setor externo mostraram uma tendência positiva nesse período. Destacam-se os portos, transporte aéreo, turismo, Canal do Panamá, Zona Franca de Colón e, em menor medida, a exportação de frutas não tradicionais. No setor interno, prosseguiram com bom crescimento a construção, as atividades de intermediação financeira, telecomunicações, atacado, extração de minérios, e atividades agropecuárias tais como o cultivo de arroz, milho e sorgo e a cria de gado bovino, suíno e aves.

Tabela 1 – Evolução do Produto Interno Bruto anual das principais atividades selecionadas da economia panamenha, a preços constantes de 1996, em milhões de dólares, no período entre 1999 e 2010

Ano	Atividades selecionadas									
	Agricultura	Pesca	Industria manufatureira	Fornecimento de eletricidade, gás e água	Construção	Comercio (Atacado e varejista)	Transp., armazenamento e comunicações	Intermediação financeira	Atividades imobiliárias	Hotéis e restaurantes
1999	594,5 (5,4%)	132,2 (1,2%)	1179,6 (10,7%)	342,5 (3,1%)	503,4 (4,5%)	1586,7 (14,3%)	1531,6 (13,8%)	1024,2 (9,3%)	723,6 (6,5%)	236,4 (2,1%)
2000	599,9 (5,3%)	197,8 (1,7%)	1095,2 (9,6%)	374,5 (3,3%)	510,9 (4,5%)	1658,1 (14,6%)	1723,8 (15,2%)	1123,3 (9,9%)	733,0 (6,4%)	234,5 (2,1%)
2001	588,3 (5,1%)	261,0 (2,3%)	1026,3 (9,0%)	357,0 (3,1%)	394,1 (3,4%)	1703,5 (14,9%)	1767,5 (15,5%)	1090,4 (9,5%)	690,5 (6,0%)	259,2 (2,3%)
2002	565,2 (4,8%)	312,3 (2,7%)	999,33 (8,5%)	381,5 (3,3%)	365,4 (3,1%)	1668,1 (14,3%)	1803,2 (15,4%)	1011,9 (8,7%)	717,5 (6,1%)	277,4 (2,4%)
2003	581,1 (4,8%)	377,8 (3,1%)	965,4 (7,9%)	387,0 (3,2%)	491,0 (4,0%)	1686,8 (13,8%)	1999,0 (16,4%)	939,4 (7,7%)	753,9 (6,2%)	306,2 (2,5%)
2004	592,9 (4,5%)	379,0 (2,9%)	985,5 (7,5%)	410,6 (3,1%)	561,6 (4,3%)	1881,9 (14,4%)	2296,3 (17,5%)	887,0 (6,8%)	834,9 (6,4%)	347,6 (2,7%)
2005	621,6 (4,4%)	375,4 (2,7%)	1026,9 (7,3%)	433,4 (3,1%)	566,8 (4,0%)	2047,4 (14,6%)	2567,9 (18,3%)	1032,4 (7,4%)	899,0 (6,4%)	386,1 (2,7%)
2006	670,6 (4,4%)	368,5 (2,4%)	1066,7 (7,0%)	447,6 (2,9%)	671,2 (4,4%)	2274,0 (14,9%)	2920,9 (19,2%)	1187,1 (7,8%)	947,4 (6,2%)	433,2 (2,8%)
2007	700,2 (4,1%)	356,2 (2,1%)	1125,7 (6,6%)	488,6 (2,9%)	809,0 (4,8%)	2465,1 (14,5%)	3427,2 (20,2%)	1416,3 (8,3%)	1015,4 (6,0%)	493,9 (2,9%)
2008	714,8 (3,8%)	413,1 (2,2%)	1171,9 (6,2%)	501,2 (2,6%)	1075,0 (5,7%)	2704,6 (14,3%)	4050,6 (21,4%)	1636,7 (8,7%)	1052,6 (5,6%)	531,9 (2,8%)
2009	653,5 (3,4%)	401,3 (2,1%)	1168,2 (6,1%)	536,9 (2,8%)	1124,7 (5,8%)	2603,8 (13,4%)	4388,1 (22,6%)	1600,8 (8,3%)	1003,5 (5,2%)	542,7 (2,8%)
2010	664,9 (3,2%)	224,9 (1,1%)	1176,6 (5,6%)	575,9 (2,8%)	1201,8 (5,8%)	3042,3 (14,6%)	4856,5 (23,3%)	1708,4 (8,2%)	1097,7 (5,3%)	610,0 (2,9%)

Fonte: CGR (2011a).

Nota: Entre parêntesis indica porcentagem com relação ao PIB total.

Nos últimos 11 anos, o crescimento médio da população panamenha foi de aproximadamente 1,93% a.a (CGR, 2011b), passando de 2,81 milhões em 1999 a 3,41 milhões em 2010. No mesmo período, a população em idade de trabalhar (15 anos ou mais) cresceu a uma taxa anual maior (3,2%), passando de 1,76 para 2,45 milhões. A população economicamente ativa (pessoas capazes de trabalhar e trabalham) passou de 1,08 para 1,56 milhões nesse período, com crescimento médio de 4,04% a.a.

O crescimento médio do número de pessoas empregadas, entre 1999 e 2010, foi de 3,5% a.a, passando de 0,98 para 1,36 milhões. Portanto o número de desempregados diminuiu de 131.244 em 1999 para 100.178 em 2010 (CGR, 2011b).

Tabela 2 – Evolução de indicadores selecionados do Mercado de Trabalho panamenho, no período entre 1999 e 2009

Ano	Indicador							
	População Total (milhões)	População total com 15 e mais anos de idade (milhões)	Empregados (milhões)	Desempregados (milhões)	População economicamente ativa (milhões)	Taxa de participação (%) (1)	Taxa de emprego (%) (2)	Taxa de desemprego (%) (3)
1999	2,809	1,824	0,986	0,131	1,117	61,2	88,2	11,7
2000	2,948	1,865	0,966	0,151	1,117	59,9	86,5	13,5
2001	2,991	1,907	0,984	0,170	1,154	60,5	85,3	14,7
2002	3,035	1,950	1,050	0,172	1,222	62,7	85,9	14,1
2003	3,079	2,007	1,088	0,172	1,260	62,8	86,4	13,6
2004	3,124	2,051	1,135	0,160	1,295	63,1	87,6	12,4
2005	3,170	2,094	1,188	0,137	1,325	63,3	89,7	10,3
2006	3,216	2,138	1,211	0,121	1,332	62,3	90,9	9,1
2007	3,263	2,181	1,264	0,092	1,356	62,2	93,2	6,8
2008	3,310	2,224	1,334	0,083	1,417	63,7	94,1	5,9
2009	3,359	2,268	1,344	0,100	1,444	63,7	93,1	6,9
2010	3,406	2,311	1,363	0,100	1,463	63,3	93,2	6,8

Fonte: CGR (2011b).

(1) Taxa de participação = [População economicamente ativa/população com 15 anos o mais]*100.

(2) Taxa de emprego = [Empregados/população economicamente ativa]*100.

(3) Taxa de desemprego = [Desempregados/população economicamente ativa]*100.

Em termos relativos, entre 1999 e 2010, a participação da população no mercado de trabalho aumentou de 61,2% para 63,3%. Nesse período, a taxa de emprego registrou um aumento importante neste, passando de 88,2% para 93,2%, com a taxa de desemprego diminuindo de 11,7% em 1999 para 6,8% em 2010, sendo que a taxa de desemprego de 2008 (5,9%) representa uma das mais baixas da história do país.

2.2 Canal do Panamá

A economia do Panamá gira em torno do Canal, que é seu principal recurso, daí se deriva a sua importância. Nesta seção são apresentadas não somente informações históricas sobre o Canal do Panamá, mas principalmente descreve-se a sua importância para o transporte marítimo internacional e o seu impacto sobre a economia nacional. Além disso, caracterizam-se aspectos relacionados com o entorno geográfico e operativo do Canal. Tenta-se, desta forma, mostrar a relação intrínseca existente entre a economia panamenha e as florestas, as quais desempenham uma função ambiental relevante para a operação do Canal do Panamá.

2.2.1 Antecedentes históricos²

A história do Canal do Panamá pode ser remontada à chegada de Cristóvão Colombo às Américas, quando o istmo do Panamá já era usado como via de transporte do Pacífico ao Atlântico. Como esta rota era de grande perigo, no ano 1534 o Rei da Espanha instrui Pascual Andagoya estudar a comunicação oceânica usando as águas do rio Chagres, perto de Panamá. O relatório final concluiu que era possível a construção de um canal, mas isso exigiria grandes somas de dinheiro.

Alguns eventos históricos mostram os esforços mobilizados em torno da construção de um canal através do istmo do Panamá. Charles Marie de la Condamine, em 1735, depois de realizar uma medição do círculo equatorial, enviou um estudo para a construção do canal para a Academia das Ciências de Paris. Após isso, em 1782,

² Extraído de SABONGE, R.; SÁNCHEZ, R. El Canal de Panamá en la economía de América Latina y el Caribe, 2009.

Benjamin Franklin, na sua imprensa *Possey* (França), publica um manuscrito de um canal proposto através do istmo.

Em 1826, convocado por Simón Bolívar, o Congresso Anfictiônico foi realizado no Panamá. Os Estados Unidos mostrou-se interessado na construção de um canal no Panamá. Em 1846, o governo francês ordenou Napoleão Garella, para realizar um estudo abrangente sobre o terreno do Istmo e determinar a possibilidade de construir um canal. Finalmente, em meados do século, é assinado o Tratado Vallarino-Bidlack entre os Estados Unidos e a Nova Granada. Nesse tratado permite-se a intervenção dos Estados Unidos. Quatro anos depois, em 1850, assinou-se o Tratado Clayton-Bulwer entre os Estados Unidos e a Grã-Bretanha sobre a construção e proteção do Canal.

No mesmo ano (1850), iniciou-se a construção de uma ferrovia atravessando o istmo do Atlântico ao Pacífico. Em 1855, a ferrovia foi concluída, o que renovou o interesse pela construção do canal. Um ano depois, reuniu-se em Paris um Congresso Internacional onde foram submetidos a estudo dez projetos para a construção do canal. Destes projetos foi escolhido o terceiro, Panamá, 72 milhas, 25 exclusas, de cidade de Panamá até Colón através do rio Chagres. Em fevereiro de 1881, foram inauguradas as obras pelo Conde Ferdinand de Lesseps, mas sua empresa foi um fracasso por causa da má gestão, do clima insalubre e do uso de equipamentos inadequados. Eles gastaram quatrocentos milhões de dólares e só puderam completar dois quintos do projeto.

Em 1894, na França, organizou-se a *Compagnie Nouvelle du Canal de Panamá* que assumiu a continuidade dos trabalhos do projeto até 1904. Nesse ano, com a assinatura do Tratado Hay - Bunau Varilla (Estados Unidos - França), os Estados Unidos compraram da *Compagnie Nouvelle du Canal de Panamá* os direitos da obra do Canal. Logo da limpeza da área o canal foi concluído após 10 anos a um custo de cerca de 387 milhões de dólares da época. O Canal do Panamá foi aberto para a navegação mundial no dia 15 de agosto de 1914.

Figura 2 - Trabalhos de construção do Canal do Panamá – 1904 -1914

Fonte: <http://sobrefotos.com/2009/05/20/construccion-del-canal-de-panama> (2011).

O Panamá e os Estados Unidos deram início a uma relação visando administrar, operar e defender o Canal. Em setembro de 1977 foi assinado o Tratado Torrijos - Carter que estabelecia a devolução gradual do canal ao Panamá até final do século. No dia 31 de dezembro de 1999, como estava previsto no Tratado, os Estados Unidos transferiram o Canal em sua totalidade ao Panamá.

A República do Panamá assumiu, assim, a responsabilidade pela administração do Canal através de uma agência governamental chamada Autoridade do Canal do Panamá - ACP, instituída pela Constituição. ACP é uma entidade autônoma responsável legítima e exclusivamente da gestão, operação, manutenção, conservação e modernização do Canal, a fim de operar de forma segura, contínua, eficiente e rentável. Portanto, ACP tem o objetivo fundamental de preservar as condições mínimas que façam do Canal do Panamá um negócio destinado ao serviço do transporte marítimo e comércio internacional.

2.2.2 Importância para o comercio internacional

O uso do Canal do Panamá permite reduzir distâncias e custos de transporte em comparação com outras rotas alternativas. Através dele, um navio que navega de

Yokohama, no Japão, à Nova Orleans nos Estados Unidos encurta a viagem em aproximadamente de 5.260 milhas náuticas³ em comparação com o Canal de Suez e 6.496 milhas náuticas em comparação com a rota pelo Cabo de Boa Esperança na África. Entre o Chile a Europa a distancia evitada é de aproximadamente 1.300 milhas náuticas e entre Equador e Nova York de 7.366 milhas náuticas. Estes exemplos ilustram as vantagens do Canal que variam dependendo da origem e destino da carga (ACP, 2006).

Após sua construção, o movimento de carga pelo Canal evoluiu conforme as transformações que ocorreram no contexto econômico-político internacional (Figura 3). As mudanças tecnológicas, aumento dos requerimentos de matérias primas e produtos processados das economias que se beneficiam do Canal foram os fatores que motivaram essa evolução.

Figura 3 – Evolução do movimento de carga comercial em toneladas CP/SUAB e número de transitos de navios pelo Canal do Panamá, no período 1915-2010

Fonte: Intracorp e Asesores Estratégicos (2006), ACP (2001 -2011).

Nas primeiras cinco décadas de operação (1914-1965), o incremento da carga comercial pelo Canal ocorreu pelo aumento do número de transitos. Na década de

³ Milha Náutica é uma unidade de distancia que equivale a 1.852 metros.

1970, o número de trânsitos se estabilizou devido a um aumento paulatino no tamanho dos navios. Essa tendência de crescimento no tamanho dos navios tem permanecido até a presente data (2011). Uma prova desta tendência é que o número de navios de grande capacidade (Panamax) tem aumentado, representando na atualidade mais de 40% dos trânsitos pelo Canal (ACP, 2006).

2.2.3 Impacto na economia panamenha

Como já foi ressaltado, o Canal tem grande importância para a economia panamenha pela geração direta e indireta de rendas para o Estado e pelo seu impacto sobre os setores de serviços, transporte, comunicação, comércio e outras atividades complementares ao trânsito de navios. Os aportes diretos do Canal ao Tesouro Nacional, durante os dez primeiros anos de administração panamenha (de janeiro de 2000 até setembro de 2010) atingiram USD 5.533,4 milhões, sendo que no ano 2010 a renda total foi 2,55 vezes maior em relação à 2000 (ACP, 2001-2011).

Figura 4 – Geração de rendas diretas pelo Canal do Panamá, a preços correntes, no período 2000 – 2010

Fonte: ACP (2001-2011).

Estimações de 2005 indicam que, para esse ano, as atividades relacionadas ou que dependem do Canal contribuíram com USD 2.876,7 milhões ao PIB, cinco vezes

mais que a contribuição direta do Canal ao País. Essa contribuição representa mais de 22% do PIB do Panamá, mais de 41% da geração de divisas e geraram mais de 28% das receitas fiscais (SABONGE; SANCHEZ, 2009). Para esse ano, o Canal foi responsável por cerca de 192.000 empregos diretos e indiretos (aproximadamente 21.1% do emprego), através do seu efeito multiplicador (ACP, 2006). Mas, o impacto do Canal na economia panamenha, é muito mais amplo por três razões principais:

- a) considera-se como uma exportação de serviços. Cada dólar gerado diretamente pela operação de trânsito de navios no Canal tem um efeito multiplicador na atividade econômica nacional já que, ao fluir, causa demandas secundárias e derivadas por outros bens e serviços no país;
- b) é o ponto focal de uma variedade de atividades econômicas adicionais, indiretas e induzidas, que dependem do Canal, tais como as vendas de combustíveis a navios em trânsito ou que estão localizadas no Panamá pela competitividade internacional que o tráfego de navios pelo Canal confere à posição geográfica do país, tais como os portos de trasbordo e a Zona Franca de Colón. Esse conjunto de atividades econômicas define-se como o Sistema Econômico do Canal - SEC; e,
- c) existem outras atividades econômicas paralelas de exportação de serviços, localizadas no Panamá, que têm crescido estimuladas pelo sistema monetário, ou fiscal e/ou por leis especiais, como o centro bancário e os serviços legais que, em forma crescente vinculam-se economicamente com o SEC.

Esse impacto econômico não somente ocorre nas proximidades do Canal (Região Interoceânica), onde a sua atividade se concentra. Também ocorre no interior do país pela demanda de bens e serviços ali produzidos e pelo gasto de receitas públicas que são geradas na Região Interoceânica.

A relação do efeito do Canal sobre a economia panamenha é apresentada na Figura 5. De acordo com Intracorp e Asesores Estratégicos (2006), o sistema econômico do Canal compõe-se de 29 atividades complementadas e vinculadas entre

si. Estas vão se convertendo em um conglomerado econômico que gera uma exportação de serviços múltiplos e que aumentam sua produtividade e competitividade devido às suas vinculações cruzadas. As rendas geradas desta forma circulam na economia nacional criando demandas secundárias por outros bens e serviços.

Assim, por exemplo, os empregados do Canal gastam suas receitas, provenientes do exterior pela exportação do serviço do Canal, nos supermercados, nas lojas, em seus automóveis, hipotecas, restaurantes, recreação, entre outras. Por sua vez elas geram demandas secundárias de alimentos, roupas, combustíveis, etc., causando um impacto múltiplo na economia, o que aumenta a produção, as receitas fiscais e o emprego. Análises feitas com modelos econométricos indicam que esse efeito multiplicador foi de 1,27 para o período 1980-1999. Isto significa que cada dólar gerado pelo SEC converte-se em 1,27 de atividade econômica no país (INTRACORP; ASESORES ESTRATEGICOS, 2006).

Figura 5 - Conglomerado e sistema econômico derivado das operações do Canal

Fonte: Intracorp e Asesores Estratégicos (2006).

2.2.4 Operação e geografia

O Canal do Panamá apresenta 80 quilômetros de comprimento e une o oceano Atlântico com o Pacífico através de um sistema de canais e lagos artificiais de água doce conectados por exclusas. As câmaras das exclusas têm 33,53 m de largura, 304 m de comprimento e 26 m de profundidade e operam mediante um sistema de água por gravidade. Sua construção implicou atravessar montanhas que, em alguns pontos, tinham elevações de mais de 95 msnm⁴.

Para seu funcionamento o Canal utiliza água da bacia de duas formas principais: para a navegação e para as operações de exclusagem. A navegação não supõe extração de água do sistema, mas estabelece um limite mínimo até onde se pode baixar o nível do lago principal (lago Gatún), antes de impor restrições de profundidade aos navios que transitam pelo Canal. Por outro lado, as exclusas utilizam água doce do lago Gatún para elevar e baixar os navios dentro das câmaras. Os navios são elevados a quase 24 msnm até o nível do lago Gatún ao iniciar seu transito e, ao terminá-lo, baixam novamente do nível do lago Gatún ao nível do mar. Em média, transitam pelo canal 39 navios/dia. Cada navio utiliza em torno de 210.000 m³ de água que são fornecidos pela bacia hidrográfica e que são despejados no mar.

Figura 6 – Ilustração do trajeto percorrido pelos navios que transitam o Canal do Panamá

Fonte: <http://www.editorialvirtual-mapp.com/CANAL-PANAMA.html> (2011).

⁴ Metros acima do nível médio do mar.

O lago Alhajuela foi construído em 1935 com o represamento do rio Chagres no meio de seu curso⁵. Este é o mesmo rio no qual se construiu também o lago Gatún. Ele está situado a uma elevação de 73 msnm, tem uma superfície de 4.400 ha e aporta em torno de 46 % do total de água da bacia. Sua capacidade total de armazenar água alcança um volume máximo de 799,5 MM³, com um volume útil de 651 MM³ de água entre as elevações de 57,91 a 76,81 msnm. A armazenagem de água abaixo de 57,91 msnm está reservada para garantir o consumo de água da população (ACP, 2006).

Aproximadamente 9% das águas que chegam anualmente aos lagos do Canal se evaporam da sua superfície (aproximadamente 473 MM³ anuais), e 91% esta efetivamente disponível para abastecer o consumo da população e assegurar o funcionamento do Canal. Em consequência, a bacia do Canal, com a configuração atual dos lagos, proporciona uma média de 4.790 MM³ de água por ano para esses propósitos.

Por ser um país tropical e influenciado pelas perturbações climáticas que acontecem no Mar Caribe, as precipitações no Panamá são geralmente abundantes. Ocorrem com maior intensidade na segunda metade do ano, especialmente nos meses de outubro e novembro. Na área da bacia do Canal a precipitação média frequentemente registra valores superiores a 3.000 mm anuais e, em certos pontos geográficos da bacia, as chuvas podem atingir até 5.000 mm anuais.

Figura 8 - Precipitação media anual, em milímetros, na bacia hidrográfica do Canal do Panamá, entre 1999 e 2010

Fonte: Elaborado com dados fornecidos pela ACP (2011).

⁵ Entre 1914 a 1935 o Canal operava unicamente com o lago Gatún.

No ano de 2003, a bacia hidrográfica era coberta com 210.542,8 ha de floresta (62% da área total da bacia incluindo a área ocupada pelos lagos). Desta fração, 23,7% representa floresta madura que normalmente se localiza dentro de Parques Nacionais e alguns remanescentes nas margens do Canal. Estas florestas estão geralmente associadas com zonas de relevo acidentado e com áreas que registram alta precipitação. Enquanto que 23,15% correspondem a florestas secundárias localizadas principalmente nas margens leste e oeste do Canal e 15,14% correspondem a restolhos (CICH, 2006). Estima-se que a taxa média anual de desmatamento para o período 1985-2003 foi de 0,39% (599,87 ha.ano⁻¹) na bacia do Canal. Para as sete microbacias analisadas, a taxa de desmatamento atingiu 0,9% (788,48 ha.ano⁻¹) no período 1999-2010.

A cobertura florestal nativa fornece uma serie de serviços ambientais de vital importância para o sustento das populações e da vida silvestre na área (CICH, 2004, 2006). Mas, a conservação dos recursos naturais da bacia serve ao propósito principal de evitar a diminuição na provisão de água, indispensável para o funcionamento do Canal e para o consumo da população.

Tabela 3 - Superfície por tipo de uso do solo na bacia hidrográfica do Canal do Panamá, em ha e porcentual - 2003

Uso do Solo	Superfície (hectares)	%
Floresta madura	80.510,80	23,70
Floresta secundária	78.616,30	23,15
Matorral e restolho	51.415,70	15,14
Pastagem (pecuária)	66.009,30	19,43
Saccarum spontaneum (gramínea invasiva)	8.979,10	2,64
Agricultura	292,90	0,09
Plantações florestais	2.608,90	0,77
Lugares povoados	5.560,50	1,64
Solo descoberto	2.105,20	0,62
Mineração	363,80	0,11
Águas	43.006,20	12,66
Sem Informação	180,30	0,05
Total	339.649	100

Fonte: CICH (2006).

A proteção e salvaguarda do recurso hídrico têm importância estratégica para o Panamá. Portanto, o Canal enfrenta o desafio de garantir a provisão da água para

satisfazer as demandas, cujo comportamento expressa necessidades crescentes, tanto no consumo da população como também para o Canal. A esse desafio se soma a conservação dos recursos e o desenvolvimento sustentável das regiões da bacia como estratégia para manter a viabilidade do Canal no longo prazo.

2.3 Caracterização da área de estudo

A bacia do Canal do Panamá não é uma área geográfica delimitada em termos políticos e administrativos, mas é definida pelas microbacias hidrográficas que drenam suas águas nos lagos Alhajuela, Gatún e num pequeno reservatório chamado Miraflores (ACP, 2010). Embora a bacia hidrográfica do Canal esteja composta por mais de 20 microbacias, o presente estudo analisa as sete que têm dados hidrométricos completos e que incluem medições do volume de sedimentos.

2.3.1 Microbacia do rio Chagres

O rio Chagres foi represado na parte baixa e média para formar os lagos Gatún e Alhajuela, respectivamente. Mas, apenas a parte da bacia que drena no lago Alhajuela é chamada de microbacia do rio Chagres. Está localizada no lado leste da bacia do Canal do Panamá e todo o seu território está contido dentro do Parque Nacional Chagres, considerada a mais importante área protegida da bacia do Canal. A microbacia do rio Chagres é a maior e mais importante para o funcionamento do Canal. Deságua no reservatório Alhajuela, representando uma fração significativa da água usada para o trânsito de navios. Esta microbacia também fornece água potável para grande parte da população da Cidade de Panamá.

A sua área total de drenagem é de 45.830 ha, representando 15,45% do território total da bacia do Canal do Panamá com uma declividade média de 13,32 graus. A unidade da camada de rocha é afetada por mudanças na geometria e gradientes dos leitos que são côncavos na sua seção longitudinal. Este fator e os deslizamentos freqüentes favorecem a produção de sedimentos, apesar da densa vegetação

(HARMON, 2005). A precipitação média anual ocorrida no período 1999-2010 foi de 3.682,08 mm sendo que 90% das chuvas caem historicamente de maio a dezembro. Para o período 1999-2009 a vazão média do rio Chagres foi de $33,98 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e a produção de sedimentos foi de $4,28 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Não há registros precisos sobre a população, mas se estimam em 2.600 os habitantes que se dedicam basicamente à agricultura de subsistência e pecuária (AUTORIDAD NACIONAL DEL AMBIENTE - ANAM, 2005). As principais culturas agrícolas incluem grãos, como arroz, milho, feijão, assim como banana, inhame, mandioca e alguns legumes. Os solos da microbacia são classificados, pela sua origem, como Litossolos, Cambissolos e Latossolos, geralmente ácidos e de fertilidade baixa. Estes solos são típicos dos trópicos úmidos, desenvolvidos sob condições de intenso intemperismo e lixiviação. Atualmente, ao redor de 2,22% da superfície da microbacia é usada pela agricultura, 1,87% por atividades pecuárias e as florestas ocupam 95,77% da sua área (Figura 9).

Figura 9 - Mapa temático da microbacia Chagres para os anos 1999, 2005 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Figura 10 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Chagres, em percentual, no período entre 1999 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

2.3.2 Microbacia do rio Pequení

Localizada no lado nordeste da bacia hidrográfica do Canal do Panamá, as suas águas drenam para o reservatório de Alhajuela. Todo o seu território também está dentro do Parque Nacional Chagres. Esta microbacia tem uma área total de drenagem de 16.837,5 ha, representando 5,68% do total da bacia do Canal do Panamá. Possui vários afluentes, sendo o rio San Miguel e o córrego Trinidad os principais. O leito principal do rio Pequení nasce a 580 msnm e corre na direção nordeste-sudoeste, com um comprimento total de 26,5 km. O rio San Miguel, seu principal afluente, nasce a 960 msnm.

A temperatura média anual tem-se mantido historicamente dentro do intervalo de todo o setor leste da bacia hidrográfica do Canal, apresentando valores em torno de 26,5 °C, com pouca variação ao longo do ano. A precipitação média anual varia em torno de 4.252 mm. Enquanto que, a vazão média anual do período 1999-2009 é de 14,16 m³.s⁻¹ e a produção média de sedimentos é de 6,04 t.ha⁻¹.ano⁻¹.

Esta microbacia estava desabitada até o início dos anos 1950, principalmente devido à falta de vias de acesso. Atualmente, existem nove aldeias com

uma população de 392 pessoas entre indígenas e camponeses (CICH, 2007a). A sua principal atividade econômica é a pecuária e agricultura de subsistência, que ocupam uma área próxima a 11,76 % do total da microbacia e 88,24% da sua área ainda está coberta por florestas.

Figura 11 - Mapa temático da microbacia Pequení para os anos 1999, 2005 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Figura 12 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Pequení, em percentual, no período entre 1999 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

2.3.3 Microbacia do rio Boquerón

Localizada no lado nordeste da bacia hidrográfica do Canal, as suas águas drenam para o lago Alhajuela. Tem uma área total de drenagem de 10.179,5 ha, representando 3,43% do total da bacia do Canal do Panamá. Entre seus principais afluentes encontram-se os rios Longue, Diablo, Indio, Escandaloso, Mauro; e os córregos Peluca, La Mina, Diamante e La Herradura. O leito principal do rio Boquerón nasce na cordilheira de San Blas a 260 msnm e corre na direção norte-sul, com um comprimento total de 22,3 km. Um dos seus principais afluentes, o rio Diablo, tem sua nascente na Serra Llorona a 960 msnm. No período 1999-2009 a vazão média anual foi de $7,91 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a produção média de sedimentos $5,30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$.

No total, nesta microbacia existem atualmente quatro comunidades, que no ano 2000 tinham uma população aproximada de 410 pessoas (CICH, 2007b). A parte media e baixa da microbacia do rio Boquerón estava despovoada até 1954, principalmente devido à falta de vias de acesso. Em 1954, alguns homens começam a chegar ao que hoje se chama Boquerón Arriba, iniciando-se assim o desmatamento das florestas. Então, pouco a pouco, algumas famílias começaram a chegar, e em 1960 a comunidade já estava bem estabelecida.

Figura 13 - Mapa temático da microbacia Boquerón para os anos 1999, 2005 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Figura 14 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Boquerón, em percentual, no período entre 1999 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Ao melhorar o acesso, chegaram mais famílias e muitos dos antigos residentes mudam da atividade madeireira para mineração. Mas a população se reduziu após a criação do Parque Nacional Chagres em 1984, devido aos conflitos gerados pela restrição de uso da terra. Estima-se que atualmente 51% da população dedica-se a atividades pecuárias (bovinos, equinos e caprinos) e agricultura de subsistência (culturas tradicionais como arroz, milho, legumes). Algumas famílias geram sua renda com a criação de animais domésticos: galinhas, patos e porcos. Assim, atualmente (2010) 62,4% da área total da microbacia de Boquerón conserva a cobertura florestal, enquanto que 20,47% e 16,37% do seu território são dedicados, respectivamente, à agricultura e pastagem.

2.3.4 Microbacia do rio Gatún

Localizada na parte norte da bacia do Canal, no distrito de Colón, província de Colón. A área total de drenagem abrange 12.973,00 ha, representando 4,37% do total da bacia do Canal do Panamá. Como o rio Boquerón, o rio Gatún nasce dentro do

Parque Nacional Chagres no morro Bruja, na serra Llorona, a 650 msnm, e na maior parte do seu percurso corre na direção nordeste-sudoeste, com um comprimento de 36,5 km. Descarrega suas águas diretamente para o lago Gatún. Para o período 1999–2009 a sua vazão média foi de $6,49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a produção de sedimentos nesse mesmo período foi de $3,11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$.

Figura 15 - Mapa temático da microbacia do rio Gatún para os anos 1999, 2005 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Esta microbacia foi escassamente povoada até 1950, principalmente devido à falta de vias de acesso. A primeira comunidade desta microbacia foi fundada em 1935 por três famílias que subiram pelo rio Gatún. Com a construção da estrada trans-istmica em 1942, na parte inferior desta microbacia, deu-se início a um aumento do processo de povoamento, e essa dinâmica continua na atualidade devido às melhoras nas estradas de acesso e nas condições de transporte.

Na atualidade, existem 14 comunidades com uma população próxima a 1.136 habitantes (CICH, 2007c), cuja economia depende da pecuária e da agricultura de subsistência. As florestas ocupam 22,11% da superfície da bacia, enquanto que os usos pecuários e agrícolas representam 47,42% e 28,52%, respectivamente.

Figura 16 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Gatún, em porcentual, no período entre 1999 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

2.3.5 Microbacia do rio Trinidad

O Rio Trinidad nasce a 740 msnm, no lado oeste da bacia do Canal, no distrito de Capira, província de Panamá. Tem uma área total de drenagem de 19.860 ha, o que representa 6,69% do território total da bacia do Canal. Tem como afluente principal o rio El Cacao, além de outros vinte pequenos afluentes. Corre na direção sul-norte ao longo de 46,9 km e descarrega no lago Gatún. No período 1999-2010, a microbacia do rio Trinidad registrou uma precipitação média anual de 2.499 mm com chuvas que variaram entre 2.054 e 3.129 mm. Para o período 1999-2009, a sua vazão média foi de $7,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a produção de sedimentos nesse mesmo período foi de $1,73 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$.

Embora a primeira comunidade tivesse sido fundada em 1887 (El Cacao), somente após 1940 outras famílias começaram a povoar as partes superior e inferior da microbacia, devido à melhoria das vias de acesso. Consequentemente, também foi acelerado o processo de desmatamento para estabelecimento de pastagens e plantações. No ano 2000 a microbacia de Trinidad tinha uma população de 4.653 habitantes distribuída em 32 comunidades (CICH, 2007d, 2008).

Figura 17 - Mapa temático da microbacia do rio Trinidad para os anos 1999, 2005 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Figura 18 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Trinidad, em percentual, no período entre 1999 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

A economia dessas comunidades é baseada em atividades pecuárias (bovinos) e agrícolas (milho, arroz, banana, mandioca, inhame e frutas), que ocupam cerca de 52,16% e 28,48% respectivamente da área total da microbacia. As florestas, por sua vez, ocupam 19,22% da área da microbacia e são encontradas principalmente como remanescentes nas nascentes do rio Trinidad, dentro dos limites do Parque Nacional Altos de Campana. Na área predominam os Latossolos, que são caracterizados pela cor castanho-avermelhada ou amarela.

2.3.6 Microbacia do rio Cirí Grande

O rio Cirí Grande nasce a 921 msnm no distrito de Capira, província de Panamá, na parte oeste da bacia do Canal, corre na direção sul-norte quase paralelo ao rio Trinidad. Possui uma área total de drenagem de 20.830 ha, o que representa 6,69% do total da bacia do Canal. Têm dois afluentes principais, os rios Cirí e Ciricito, além de 15 outros pequenos afluentes, incluindo córregos e riachos. Tem um comprimento de 42,7 km e deságua no lago Gatún. No período 1999-2010, a microbacia do rio Cirí Grande registrou uma precipitação média anual de 2.675 mm, variando entre 2.168 e 3.422 mm. Para o período 1999-2009 a sua vazão média foi de $9,77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a produção de sedimentos foi de $1,48 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$.

As primeiras comunidades na microbacia do rio Cirí Grande foram estabelecidas em 1889 e 1903. A partir de 1940, começaram a melhorar as estradas de acesso e, em seguida, outras famílias começaram a chegar e, pouco a pouco, eles formaram outras comunidades nas partes superior e inferior da microbacia. No ano 2000, a microbacia do rio Cirí Grande tinha uma população de 4.457 habitantes distribuídos em 45 comunidades (CICH, 2007e, 2008). A sua economia baseia-se na pecuária e na agricultura de subsistência (milho, arroz, banana, mandioca, inhame e frutas).

Atualmente, os usos agrícolas e pecuários ocupam 30,58% e 29,31% da superfície da microbacia, respectivamente. As florestas ocupam 32,48% da superfície e são encontradas como remanescentes nas margens de rios, córregos e matas ciliares. Na área predominam os Latossolos, que são caracterizados pela cor castanho-avermelhada ou amarela.

Figura 19 - Mapa temático da microbacia do rio Cirí Grande para os anos 1999, 2005 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Figura 20 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Cirí Grande, em percentual, no período entre 1999 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

2.3.7 Microbacia do rio Caño Quebrado

Localizada ao oeste da bacia hidrográfica do Canal do Panamá, possui uma área total de drenagem de 7.413,10 ha. O rio Caño Quebrado nasce a 220 msnm, no morro do Zaino, comunidade de El Amargo, distrito de Chorrera, província de Panamá, a partir do qual percorre um total de 19,67 km, até desaguar no lago Gatún. Seu principal afluente é um córrego chamado Riecito, que nasce a mais de 200 msnm, enquanto que mais de 75% do território restante é composto por pequenas elevações menores de 110 msnm.

A temperatura média anual varia dentro da faixa de todo o setor oeste da bacia do Canal, sendo aproximadamente de 26,5° C, com pouca variação ao longo do ano. No período 1999-2010, a precipitação anual variou entre 1.590 a 2.557 mm com uma média de 2.172 mm. De acordo com as medições da ACP, no período 1999-2009 a vazão média anual foi de 2,35 m³.s⁻¹, e produção de sedimentos foi de 1,24 t.ha⁻¹. ano⁻¹.

O processo de povoamento da microbacia começou em 1903, mas registrou o seu maior crescimento após 1940. A partir desse momento, as florestas foram gradualmente derrubadas para dar lugar a plantações agrícolas e pastagens. Posteriormente, com a construção de melhores caminhos, especialmente desde meados dos anos 1970, as comunidades começaram a crescer e aumentar as áreas plantadas, o que resultou na redução de áreas florestais. Neste momento, existem 19 comunidades, que no ano 2000 apresentavam uma população de 2.204 habitantes (CICH, 2007f).

A economia depende basicamente da agricultura (principalmente abacaxi) e pecuária, sendo que a maior parte do território da microbacia é dedicada a essas atividades, 38,52% e 27,81% respectivamente. As florestas representam apenas 12,16%.

Figura 21 - Mapa temático da microbacia do rio Caño Quebrado para os anos 1999, 2005 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Figura 22 - Evolução da cobertura florestal na microbacia do rio Caño Quebrado, em porcentual, no período entre 1999 e 2010

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Uma comparação destas sete microbacias pode ser feita a partir dos dados da Tabela 4. Observa-se que são microbacias bastante pequenas com superfícies que variam entre 45.830 e 7.413 ha. A microbacia de Chagres é a maior dentre as demais, representando 34,22% da superfície total e 56% da cobertura florestal da área de estudo. E quanto que, as microbacias de Pequení e Boquerón são as que apresentam maiores produção de sedimentos com 6,04 e 5,30 t.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente. Também as microbacias de Pequení e Boquerón são as que apresentam maior precipitação média anual (4.618,42 mm e 3.948,95 mm, respectivamente).

Esse conjunto de microbacias representa uma área total de 133.923 ha que correspondem ao 45,14% da área total da bacia hidrográfica do Canal do Panamá. Nelas se produz cerca de 60% do escoamento superficial que é descarregado anualmente nos lagos Gatún e Alhajuela.

Tabela 4 - Dados médios das sete microbacias analisadas, 1999 a 2009

Dado	Microbacia						
	Chagres	Pequení	Boquerón	Gatún	Trinidad	Cirí Grande	Caño Quebrado
Área total de drenagem (ha)	45.830,00	16.837,50	10.179,50	12.973,00	19.860,00	20.830,00	7.413,10
Área de uso florestal (%)	96,14	91,97	63,94	26,18	32,67	34,05	15,18
Área de uso agrícola (%)	1,74	2,17	19,10	27,28	23,14	31,05	39,93
Área de uso pecuário (%)	1,97	5,86	16,21	45,08	43,93	28,46	32,12
Taxa de desmatamento (%)	0,11	0,45	0,45	4,44	6,84	1,53	4,62
Precipitação média (mm)	3.682,08	4.252,74	3.815,25	3.578,73	2.499,06	2.675,00	2.172,93
Vazão (m ³ .s ⁻¹)	33,98	14,16	7,91	6,49	7,03	9,77	2,43
Sedimentos (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	4,28	6,04	5,30	3,11	1,73	1,48	1,24

Fonte. Elaborada com dados de ACP (2000-2010) e da Universidade Federal de Pelotas (2011).

2.4 Processo de sedimentação na bacia do Canal

Sedimentação é o processo pelo qual partículas de terra ou solo se acumulam no fundo dos corpos d'água, reduzindo a sua capacidade de armazenamento ou fluxo. Este processo tem início quando partículas do solo são removidas da superfície da terra, transportadas pelo escoamento superficial e depositadas nas partes mais baixas das bacias hidrográficas como depressões e planícies de inundação. Elas podem ser

transportadas pelos rios a jusante, até depositar nos corpos d'água, como reservatórios, estuários e oceanos (ACP, 2010).

Desse modo, a erosão do solo, o transporte de sedimentos por escoamento superficial e, finalmente, o assoreamento dos corpos de água são processos naturais que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Estes processos são afetados por muitos fatores ambientais inter-relacionados, tais como: quantidade, distribuição e intensidade de precipitação, área e densidade de drenagem⁶, características do solo, cobertura vegetal, inclinação do terreno e cursos d'água. Além disso, as taxas em que os processos naturais ocorrem em uma bacia hidrográfica podem ser aumentadas em até 100 vezes, especialmente quando se trata de atividades humanas como desmatamento, agricultura, urbanização, construção de estradas, entre outros fatores (ACP, 2010). Segundo FAO (1997), os sedimentos, como poluentes físicos, produzem nas águas receptoras os seguintes efeitos:

- a) altos níveis de turbidez limitam a penetração de luz solar na coluna de água, o que restringe ou impede o crescimento de algas e plantas aquáticas. Nos rios que são locais de desova, os leitos de cascalho são cobertos por sedimentos finos que impedem ou dificultam a desova dos peixes. Em ambos os casos, o resultado é a perturbação do ecossistema aquático devido à destruição do habitat,
- b) elevados níveis de assoreamento de rios levam à perturbação física das características hidráulicas do leito. Isto pode ter efeitos graves sobre a navegação, pela redução de profundidade, e favorecer as inundações pela redução da capacidade do fluxo de drenagem de água na bacia.

No caso da bacia do Canal do Panamá, é importante ressaltar que atividades humanas estão se desenvolvendo e expandindo com normalidade nas partes altas e médias dos principais rios que abastecem os reservatórios de água. Apesar de não existir nessas áreas populações grandes, seu efeito sobre o ecossistema é forte, já que

⁶ Refere-se à quantidade de leitos por unidade de área em uma bacia.

muitas comunidades estão localizadas nas nascentes de rios e córregos. Na bacia do Canal, os sistemas de produção predominantes baseiam-se principalmente em atividades pecuárias de baixa produtividade que ocupam 19,43% do território e, em menor escala, na agricultura tradicional que representa 15,00%. A agricultura tradicional consiste na tala e na queima de mato (floresta secundária ou madura), o estabelecimento de cultivos de subsistência (grãos básicos, raízes e tubérculos, hortaliças) por um ou dois anos e seu posterior abandono ou conversão à pastagem (CICH, 2006).

Em geral, os povoados ocupam 1,64 % do território da bacia. A grande maioria encontra-se em áreas adjacentes à rota do Canal e seus habitantes são geralmente pessoas que trabalham nas cidades de Panamá e Colón. Solos desprovidos de vegetação ocupam 0,62 %, estão localizados principalmente nas margens do canal devido às atividades de ampliação e nas margens do lago Alhajuela, sendo que estas últimas correspondem às áreas que estão expostas a inundação quando o nível dos lagos sobe.

ACP (2010) cita vários estudos feitos sobre a produção de sedimentos e perda de capacidade de armazenamento dos reservatórios na bacia do Canal do Panamá, os quais se concentraram nas microbacias do reservatório Alhajuela. Estes estudos, descritos nos parágrafos seguintes, têm considerado que a capacidade original de armazenamento de água desse reservatório, para o nível de 76.81 msnm, é de 799,5 MM³, com exceção de um estudo de 1997, que considera uma capacidade inicial de 787,2 MM³, de acordo com estimativas feitas naquele ano.

Kellog (1931), a partir de medições de sedimentos em suspensão (MSR) do rio Chagres, no reservatório de Alhajuela, realizadas entre setembro de 1929 e fevereiro de 1931, estimou uma taxa anual de sólidos em suspensão de 0,056 MM³.ano⁻¹, equivalente a 0,634 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Com base nessa taxa de sedimentação Kellog projetou que o volume de sedimentos que se acumularia em 350 anos representaria uma perda de apenas 2,5% da capacidade original de armazenamento de água do reservatório Alhajuela. Mas as projeções de Kellog são baseadas em um único ano de registro (1930), o qual apresenta uma das taxas de sedimentação mais baixas do período 1914-2010, não sendo, portanto, representativa. Este mesmo autor estabeleceu, a partir de

dois testes de campo, que a densidade dos sedimentos no reservatório de Alhajuela é de $1,113 \text{ t.m}^{-3}$.

Wadsworth (1978), considerou que o desmatamento teve impacto sobre o aumento da sedimentação do reservatório de Alhajuela, resultando em uma perda de mais de 5% na capacidade de armazenamento, e, caso mantidas as tendências de uso da terra daquela época, resultaria em uma perda de 40% na capacidade total original de armazenamento de água para 2000.

Larson (1979), afirmou que o desmatamento de florestas nativas para culturas e pastagens estava acelerando a erosão do solo e assoreamento do reservatório Alhajuela. Com base em batimetrias⁷ de 1957 e 1970 determinou as taxas de sedimentação para dois períodos: (1) pré-desenvolvimento de 1934-1973 e (2) o uso atual da terra entre 1973 e 1978. Para o primeiro período em que não houve desmatamento significativo, estimou uma taxa de sedimentação de $0,937 \text{ MM}^3.\text{ano}^{-1}$; enquanto que para o segundo período com um desmatamento de 18% da área de drenagem da bacia do reservatório Alhajuela (17.600 ha), estimou uma taxa de sedimentação de $2,595 \text{ MM}^3.\text{ano}^{-1}$. A partir desses resultados, a perda por ele projetada na capacidade de armazenamento de água foi de 22,6% para o período 1978-2000, 46,4% para 2000-2020 e 81,3% para 2020-2040.

Alvarado (1985), a partir de uma batimetria realizada em 1983, apurou que em quarenta e nove anos (1934-1983) haveria entrado no reservatório um volume de sedimentos de $37,9 \text{ MM}^3$, que representa uma taxa de sedimentação de $0,774 \text{ MM}^3.\text{ano}^{-1}$ e uma perda na capacidade de armazenamento total de água de 4,7%. Mas, como na análise de Larson, a perda projetada de capacidade de armazenamento de água foi baseada em taxas de sedimentação que aumentavam excessivamente com o desmatamento.

Tutzauer (1990), em estudo baseado na batimetria de 1983 e dados do PMCSS⁸ sobre sólidos em suspensão nos rios Chagres, Boquerón e Pequení para o período 1981-1986, realizou uma estimação do volume de sedimentos depositados do lago Alhajuela. Tutzauer estimou que para a elevação de 76,81 msnm o volume de

⁷ Medição topográfica do fundo de um corpo de água.

⁸ Programa de medición del caudal de sólidos suspendidos da ACP.

sedimentos acumulados durante o período 1933-1983 foi de $44,5 \text{ MM}^3$, equivalente a uma taxa de sedimentação $0,890 \text{ MM}^3.\text{ano}^{-1}$ e a uma perda na capacidade de armazenamento de água de 5,6%. Posteriormente, a partir de um modelo de regressão, estimou-se que o volume total de sedimentos em suspensão transportados por esses rios durante o período 1933-1986 foi de $20,8 \text{ MM}^3$. Finalmente, fazendo alguns ajustes, ele determinou um volume de sedimentos acumulados até 1999 de $55,0 \text{ MM}^3$ e uma perda de 6,9% da capacidade original de armazenamento de água.

Panamá Canal Comission - PCC (1997) avaliou a perda de capacidade de armazenamento de água do reservatório Alhajuela. Para este fim, foram gerados modelos digitais de elevação baseados na topografia original de 1928 e batimetrias de 1983 e 1997. De acordo com os resultados, foram depositados no reservatório Alhajuela $118,6 \text{ MM}^3$ de sedimentos durante o período de 1935-1997, a uma taxa média de sedimentação de $1,88 \text{ MM}^3.\text{ano}^{-1}$, representando uma perda total de 14,8% da capacidade de armazenamento de água nesse período. Este estudo concluiu que 80% dos sedimentos estão sendo depositados no volume útil de armazenamento do reservatório. Além disso, o estudo constata que, para o período 1984-1997 a taxa de sedimentação aumentou em relação ao período 1935-1983.

ACP (2010), apresentou em junho de 2010 seu último relatório sobre sedimentos em suspensão, que foi realizado apenas para o período 1998-2007. De acordo com esse relatório, as microbacias que descarregam no reservatório Alhajuela aportaram maior volume de sedimentos em suspensão do que aquelas que descarregam no reservatório Gatún, em média 531.095 e $441.133 \text{ t.ano}^{-1}$, respectivamente. Em geral, a análise da vazão diária de sedimentos em suspensão através de curvas de duração mostra que existe uma grande variabilidade temporal. Por exemplo, durante a cheia do rio Chagres de 28 a 31 de dezembro de 2000, estima-se que 271.878 toneladas de sedimentos em suspensão foram transportadas, representando 79% da vazão de sedimentos suspensos da microbacia naquele ano. Na verdade, uma cheia extraordinária como a ocorrida nesse momento, com vazão máxima instantânea de $1.971 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, pode arrastar em poucos dias tal quantidade ou mais de sedimentos que os produzidos num ano de escoamento normal.

Para melhor compreensão e comparação, na Tabela 5 apresenta-se um resumo das taxas de sedimentação e perda de capacidade de armazenamento do Lago Alhajuela, obtidas pelos estudos anteriores. Essas taxas de sedimentação foram estimadas e projetadas por diferentes pesquisadores em diferentes momentos, mas todos abordam o problema do assoreamento do Lago Alhajuela. As batimetrias e as medições de sedimentos em suspensão (MSR) constituem as duas metodologias utilizadas nos diferentes estudos para estimação da taxa de sedimentação, embora a metodologia MSR tenha gerado resultados 31,7% menores que as batimetrias.

Tabela 5 – Resumo das estimativas da taxa de sedimentação e perda de capacidade de armazenamento de água, obtidas pelos diversos estudos realizados para o Lago Alhajuela

Estudo	Método	Período	Elevação de referência (m)	Sedimentação anual (Milhões de m³)		Perda de capac. de armazenamento (%)	
				Média do período	Média do estudo (1)	Média do período	Média do estudo (1)
Kellog, H.P, 1931	MSR 1930	1934-2000	76,81	0,056*	0,056	0,5*	0,550
		2001-2020	76,81	0,056*		0,6*	
Curtis L. Larson, 1979	Batimetria 1970	1934-1973	76,81	0,937	4,332	4,6	18,96
		1974-1978	76,81	2,595		5,9	
		1979-2000	76,81	6,08*		22,6*	
		2001-2020	76,81	9,514*		46,4*	
Luis Alvarado, 1985	Batimetria 1983	1934-1983	71,63	0,774	1,706	4,7	8,06
		1984-1990	71,63	1,96*		6,5*	
		1991-2000	71,63	2,573*		9,7*	
		2001-2010	71,63	3,186*		13,7*	
		2011-2020	71,63	3,798*		18,4*	
Jack Tutzaue, 1990	Batimetria 1983	1933-1983	76,81	0,89	0,7588	5,6	6,13
	MSR 1981-1986	1933-1986	76,81	0,71		4,7	
		1933-1986	76,81	0,868		5,8	
		1987-1999	76,81	0,695*		6,9*	
PCC, 1997	Batimetria 1997	1935-1983	76,81	1,771	1,952	10,9	14,80
		1984-1997	76,81	2,271		14,8	
		1935-1997	76,81	1,883		14,8	
ACP, 2010	Batimetria 1983	1935-1983	76,81	1,592	0,846	10,2	11,15
	Batimetria 1998	1984-1997	76,81	0,502		11,1	
	Batimetria 2008	1998-2007	76,81	0,576		11,8	
		1984-1997	76,81	0,343		10,8	
	MSR 1984-2007	1998-2007	76,81	0,53		11,8	

Fonte: ACP (2010).

⁽¹⁾ Média ponderada.

* Projeções.

2.4.1 Impacto da sedimentação nos custos de operação do Canal

Evidentemente que a redução na capacidade de armazenamento de água dos reservatórios do Canal resultante da sedimentação, combinada com períodos prolongados de secas ou mudanças no clima com menor precipitação, teria efeitos significativos na operação do canal, na economia panamenha e possivelmente na economia mundial, porque se chegaria ao nível crítico de profundidade do Canal onde muitos navios não poderiam transitar e a água para operar as esclusas também se tornaria insuficiente (ESPINOSA et al., 1997), como já ocorreu em 1998 quando o trânsito de navios teve que sofrer restrição.

Segundo os dados de produção de sedimentos da ACP para período 1999-2009, em média $3,45 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ de sedimentos são descarregados nos lagos de armazenamento de água (lago Gatún e lago Alhajuela). Mas dentro desse intervalo de tempo a produção de sedimentos na bacia do Canal tem variado bastante entre um ano e outro, alcançando seu máximo nível em 2007 com $9,71 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e o mínimo de $0,85 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ em 2005. Esse processo de sedimentação dos lagos do Canal do Panamá obriga a ACP realizar atividades de dragagem e manutenção mais freqüentes, gerando maiores custos de operação, reduzindo, portanto, os benefícios econômicos do Canal. Assim, no período 1990-2009 foram dragados em média $2,45 \text{ MM}^3.\text{ano}^{-1}$ de material rochoso e sedimentário (ACP, 2010). Isso equivale a custos de aproximadamente USD 33,7 milhões anuais.

Nos relatórios sobre volumes de dragagens no Canal do Panamá são computados juntos, num único dado, tanto as extrações de material gerado pelas obras de ampliação ou aprofundamento do leito, deslizamentos de terra e os sedimentos produzidos pela erosão de solos, não sendo possível discriminar o volume correspondente de cada tipo de material. Isso representa uma limitação importante que não permite conhecer o volume de sedimentos efetivamente dragados em relação ao volume de sedimentos total gerados na bacia e que são depositados nos reservatórios e leitos do Canal.

Uma alternativa foi realizar uma estimativa aproximada através do relatório sobre “Estimação de sedimentação nos leitos de navegação de 2007”, feito por hidrografia

pela ACP. Este relatório contém dados do volume de sedimentos depositados no fundo dos leitos e reservatórios que precisam ser dragados, incluindo sítios de influência marinha nas entradas do Canal. Indica que aproximadamente 953.602 m³ de sedimentos devem ser dragados anualmente e, dessa quantidade, 557.322 m³ estão na área de influência da bacia do Canal. Pela sua localização pode-se inferir que apenas 395.598 m³ desses sedimentos estão associados a processo de erosão de solos. Isso corresponde a 43,02% dos sedimentos produzidos anualmente na bacia do Canal do Panamá e a 16,16 % da quantidade de sedimentos que são dragados anualmente por ACP, pois uma parte importante de sedimentos é gerada por deslizamentos de terra nos taludes do Canal.

Na Tabela 6, são apresentados os dados de volume dragado no Canal durante o período 1990-2009. A segunda coluna corresponde aos dados de dragagem oficialmente registrados pela ACP para esse período. A terceira coluna é uma estimativa do custo de dragado para cada ano, usando um custo de dragagem de USD 13,78 por m³. A quarta e quinta coluna representam estimativas menos precisas de sedimentos originados pela erosão, baseadas em dados hidrográficos da ACP.

Assim, devido à sedimentação ser um problema importante que afeta a operação e benefícios econômicos do Canal, a presente pesquisa está orientada a analisar o efeito da cobertura florestal sobre o processo de produção de sedimentos neste âmbito geográfico e, através da aplicação da análise econômica, derivar o valor que pode ser atribuído a essa função natural da floresta. Portanto, o presente trabalho pretende responder concretamente a duas importantes questões: 1) em que medida a floresta da bacia do Canal do Panamá reduz a taxa de produção de sedimentos? 2) que valor econômico pode ser atribuído a esse serviço ambiental da floresta?

Tabela 6 - Volume dragado no período 1990-2009. E estimativas do custo de dragagem anual para esse período, usando um custo unitário de USD 13,78 por m³ de material dragado

Ano	Total de material dragado		Parcela de sedimentos dragados gerados por erosão de solos (1)	
	Volume (m ³)	Custo estimado (USD)	Volume (m ³)	Custo estimado (USD)
1990	3.174.246,69	43.741.119,43	512.826,29	7.066.746,28
1991	815.525,70	11.237.944,14	131.755,05	1.815.584,53
1992	1.882.275,47	25.937.756,03	304.097,46	4.190.462,96
1993	2.512.412,09	34.621.038,58	405.901,34	5.593.320,40
1994	4.156.250,52	57.273.132,17	671.477,28	9.252.956,91
1995	2.808.642,59	38.703.094,96	453.759,87	6.252.810,99
1996	2.231.196,09	30.745.882,13	360.468,52	4.967.256,23
1997	1.146.559,66	15.799.592,11	185.236,37	2.552.557,19
1998	2.157.240,09	29.726.768,51	348.520,31	4.802.609,84
1999	2.824.504,84	38.921.676,73	456.322,55	6.288.124,71
2000	3.255.303,15	44.858.077,42	525.921,64	7.247.200,25
2001	2.711.943,83	37.370.586,02	438.137,37	6.037.532,94
2002	1.738.463,29	23.956.024,12	280.863,39	3.870.297,48
2003	2.457.016,88	33.857.692,61	396.951,77	5.469.995,42
2004	3.615.148,65	49.816.748,40	584.057,71	8.048.315,31
2005	1.241.816,25	17.112.227,93	200.625,88	2.764.624,56
2006	1.950.650,00	26.879.957,00	315.143,94	4.342.683,46
2007	252.790,00	3.483.446,20	40.840,35	562.780,07
2008	3.842.458,14	52.949.073,17	620.781,48	8.554.368,76
2009	4.198.354,00	57.853.318,12	678.279,45	9.346.690,84
Média	2.448.639,90	33.742.257,79	395.598,40	5.451.345,96

Fonte: Elaborado a partir de dados fornecidos por ACP (2010).

⁽¹⁾ Estimativa baseado em dados do relatório sobre “Estimação de sedimentação nos leitos de navegação de 2007”. A partir deste relatório inferiu-se que, aproximadamente 16,16% do total de material dragado anualmente no Canal do Panamá, correspondem efetivamente sedimentos originados pela erosão do solo. Descontado um 40% de sedimentos gerados por deslizamentos de terra.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Fatores naturais e características da microbacia que regulam o processo escoamento superficial e transporte de sedimentos

A precipitação das chuvas gera escoamento superficial e sub-superficial para um grande número de afluentes que, ao se unir vão formando córregos e rios. A área total de drenagem de um rio e seus afluentes é denominada bacia hidrográfica. Cada bacia é uma unidade independente, não só no que diz respeito à água, mas também a outros fatores relacionados com o elemento água.

A chuva, declividade, cobertura vegetal e outros fatores influem sobre o processo de escoamento superficial e a sedimentação. A chuva determina o volume de água disponível na superfície da terra e o impacto das gotas contribui com a desagregação do solo. Essa desagregação faz com que existam partículas de sedimentos disponíveis para serem transportadas pelo escoamento (FAO, 2002). Durante a chuva, as primeiras gotas são retidas e armazenadas pelas folhas e caules da cobertura vegetal. Acima de um certo limite, as gotas começam a cair no chão e depois de um curto período de tempo, quase todas as gotas atingem o solo. Num segundo processo, o solo (através de suas camadas de depósitos de restos vegetais e, especialmente, nas suas depressões) armazena certa quantidade de água. Ou seja, o solo inicia o processo de percolação de água para as camadas inferiores (infiltração).

Quando a capacidade de armazenamento do solo, já descontada a infiltração, está no limite, inicia-se o processo de escoamento superficial das águas que fluem sobre a superfície e concentra-se nos leitos de córregos e rios, quando, então, se dá o transporte de sedimentos. O escoamento superficial (*runoff*) é principalmente uma função da precipitação, mas também das características topográficas, geológicas, climáticas e de vegetação da bacia. A seguir, de maneira resumida, são descritas algumas destas características das bacias que influenciam o processo escoamento superficial:

- *área de drenagem*: é uma das características mais importantes porque determina a quantidade de água recolhida pela bacia. A área de drenagem é delimitada por um divisor de águas fácil de determinar e, geralmente, é medida em hectares ou quilômetros quadrados. Dentro das mesmas condições geológicas e ambientais, o escoamento é proporcional à área de drenagem. Nas bacias pequenas a geração de sedimentos é mais limitada (GRIFFITHS et al., 2006). Existe uma relação inversa entre o tamanho da bacia e a taxa de sedimentação. Tanto as variações no regime hidrológico geradas por mudanças no uso da terra como a carga de sedimentos, são menores em bacias pequenas (FAO, 2002);
- *comprimento*: geralmente é definido como a distância medida ao longo do leito principal de drenagem desde a saída da bacia até o divisor de águas na extremidade superior da bacia. O leito principal deve estar na linha que recebe maiores fluxos de água. O comprimento é tomado ao longo do leito, seguindo seu contorno, e não em linha reta (McCUEN, 1996). O comprimento da bacia vai determinar o parâmetro de tempo de transporte de água do divisor de águas até a saída da bacia;
- *declividade*: o relevo da bacia é um fator muito importante para definir a dinâmica do escoamento superficial da água e essa dinâmica, por sua vez, reflete a magnitude do escoamento. É importante analisar tanto a declividade do leito principal, como a inclinação das encostas e leitos secundários. Gradiente, comprimento, orientação, forma e rugosidade são as principais variáveis da encosta que influenciam a erosão do solo. A declividade afeta o arraste das partículas no sentido descendente, enquanto que a declividade mais o seu comprimento afetam a velocidade do fluxo da água e, portanto, o seu poder erosivo (GENTILI et al., 2007);
- *forma da bacia*: afeta a taxa na qual a água é fornecida ao leito principal, assim, numa bacia arredondada a água se concentra mais rapidamente que numa bacia alongada (SCHWAB et al., 1966). A forma da bacia é muito importante para a análise conceitual dos problemas de erosão ou deslizamentos de terra, embora não

seja usualmente levada em conta nos modelos das análises hidrológicas tradicionais. A forma da bacia definitivamente influencia na determinação da forma do hidrograma da bacia e como isso determina, em grande parte, a magnitude dos problemas de inundação, deslizamentos e erosão;

- *forma do sistema de drenagem*: de acordo com a forma do sistema de drenagem, as bacias hidrográficas podem ser classificadas em dendrítica, treliça, retangular, paralela, radial e anelar (DE PAULA LIMA, 2008). O formato do sistema de drenagem está ligado à forma da bacia e influencia os fluxos de pico e a forma do hidrograma. Por exemplo, para a mesma área, um sistema de drenagem alongado tem fluxos de até duas vezes maiores do que aqueles obtidos num sistema largo ou do tipo arredondado;
- *densidade e estrutura do sistema de drenagem*: a densidade de drenagem é o número de leitos que existem em um sistema de drenagem e a forma interna dessa rede é chamada de estrutura de drenagem. É um indicador importante, pois reflete a influência da geologia, topografia, do solo e da vegetação da bacia hidrográfica, e está relacionado com o tempo gasto para a saída do escoamento superficial da bacia (DE PAULA LIMA, 2008). Bacias com solos impermeáveis ou argilosos possuem maior densidade de estruturas de drenagem que solos permeáveis arenosos. Por outro lado, a estrutura de drenagem influencia os processos hidrológicos e de erosão. De acordo com Garcez e Alvarez (1988), se existir um número bastante grande de cursos de água numa bacia com relação a sua área, o deflúvio atinge rapidamente os rios, e, sendo assim, haverá provavelmente picos de enchentes altos e deflúvios de estiagem baixos. Assim, a erosão geralmente está ligada a valores altos de densidade de drenagem;
- *cobertura vegetal e uso da terra*: as atividades humanas alteram as características superficiais da bacia e, portanto, sua resposta hidrológica. O tipo e percentagem de cobertura vegetal, áreas agrícolas, pastagens, áreas urbanas ou áreas pavimentadas determinam a magnitude e as características do escoamento e a forma do hidrograma de crescidas. Segundo Bruijnzeel (1990 apud FAO, 2002), em

encostas com grande declividade, o efeito estabilizador das árvores é geralmente positivo;

- *geologia e tipos de solo*: as características geológicas e os tipos de solo têm um grande efeito sobre a infiltração. As características geológicas, as propriedades do subsolo e outros fatores geotécnicos também podem ser importantes para se determinar a possibilidade de ocorrência de deslizamentos de terra, que por sua vez afeta a ocorrência de escoamentos extraordinários, fluxos hiper-concentrados e avalanches; e,
- *configuração dos leitos e geometria transversal*: os leitos em forma de U apresentam velocidades mais lentas do que os leitos em forma de V, e a presença de zonas de inundação junto ao leito permitem a sedimentação durante inundações, reduzindo a carga de materiais no fluxo. A sinuosidade, por sua vez, afeta a capacidade de armazenamento da água e o fluxo.

3.2 Bens e serviços dos ecossistemas florestais

Os ecossistemas naturais, incluídas as florestas, proporcionam benefícios para a sociedade humana. Esses benefícios consistem em uma mistura de bens e fluxos serviços, tanto públicos como privados, associados a uma multiplicidade de funções, que são definidos às vezes como “estoque”. Essas funções do ecossistema podem ser entendidas como "a capacidade dos processos naturais e os seus componentes de proporcionar bens e serviços que satisfaçam as necessidades humanas, direta o indiretamente" (GÓMEZ-BAGGETHUN; DE GROOT, 2007). De maneira geral, existem quatro tipos de fluxos de bens e serviços fornecidos por recursos naturais e ambientais (FREEMAN, 1993):

- a) como fonte de matérias-primas ou insumos para a economia. Como exemplos pode-se citar os combustíveis fósseis, produtos de madeira, minerais e água;

- b) fornecedor de suporte para a vida na forma de uma atmosfera protetora da radiação solar e através do regime de clima;
- c) fornecedor de uma grande variedade de serviços tais como recreação, desfrute da paisagem e da vida selvagem, entre outros além de serviços relacionados com a não utilização ou a existência do recurso; e,
- d) serviços de dispersão, transformação e armazenamento dos resíduos gerados pela atividade econômica.

No caso dos ecossistemas florestais, os bens e serviços ambientais estão ligados à regulação dos processos naturais, tais como abastecimento e qualidade de água, melhoria da qualidade do ar, reserva genética de plantas e animais, entre outros. Do ponto de vista físico, os ecossistemas florestais contribuem para a proteção do solo contra a erosão, redução da variação nos fluxos de água e regulam o sistema hidrológico local (CONSTANZA et al., 1997; DE GROOT et al., 2002).

Os ecossistemas florestais também fornecem vários serviços sociais e culturais. Para as pessoas que moram nas florestas esses benefícios estão relacionados com o contexto histórico e cultural da sociedade em que vivem, a forma como eles vêem a natureza e sua relação com ela. Neste sentido, as florestas são parte do patrimônio histórico e cultural da sociedade. Eles estão intimamente associados com diferentes tradições culturais e espirituais, e são muitas vezes consideradas como sítios para a paz, história, educação e comunhão com o mundo natural (MONTAGNÉ et al., 2008). Desta forma, uma ampla gama de funções dos ecossistemas e dos seus bens e serviços associados se encontram descritos na literatura e com frequência utilizam-se sistemas de classificação diferentes. Na Tabela 7, apresentam-se alguns dos serviços e funções desempenhadas pelos ecossistemas.

Tabela 7 - Principais serviços e funções que desempenham os ecossistemas naturais

Serviço	Função	Exemplos
Regulação de gases	Regulação da composição química da atmosfera.	Balanço de CO ₂ /O ₂ , produção ou destruição de ozônio, níveis SO ₃ .
Regulação do clima	Regulação da temperatura, precipitação e processos climáticos a escala global e local.	Regulação de gases estufa, processos que afetam a produção de nuvens.
Regulação de perturbações	Regular as respostas dos ecossistemas as perturbações.	Proteção contra tormentas, inundações, secas, controladas principalmente pela estrutura da vegetação.
Regulação da água	Regulação dos fluxos hidrológicos.	Provisão de fluxos de água para a agricultura ou a indústria.
Provisão de água	Armazenamento e retenção de água.	Provisão de água por zonas úmidas, açudes ou aquíferos.
Controle da erosão e retenção de sedimentos	Retenção de solos dentro do ecossistema.	Prevenção da perda de solo pelo vento, a enxurrada ou outros processos, retenção de limos em lagos e áreas úmidas.
Formação de solos	Processos de formação de solos.	Erosão de rochas e acúmulo de matéria orgânica.
Reciclagem de nutrientes	Armazenamento, reciclagem interno, processado e aquisição de nutrientes.	Fixação de nitrogênio, fósforo, e outros elementos ou nutrientes.
Tratamento de resíduos	Papel da vegetação e biota na remoção ou avaria de nutrientes e compostos.	Tratamento de resíduos, controle de poluição, desintoxicação, redução da poluição sonora.
Polinização	Papel da biota na circulação de gametas florais.	Provisionamento de polinizadores para a reprodução de culturas ou populações selvagens de plantas
Controle biológico	Controle de populações a través das relações tróficas dinâmicas.	Redução de espécies herbívoras por predadores superiores, controle de pragas e doenças.

Fonte: Constanza et al. (1997).

3.3 Efeitos da cobertura florestal no controle de erosão e sedimentos

Uma das funções de proteção mais importantes das florestas é a redução da erosão do solo pela ação das chuvas. A erosão do solo nas encostas geralmente

apresenta duas formas principais: erosão superficial e deslizamentos de terra. As florestas desempenham um papel benéfico em ambos os casos, já que a cobertura vegetal e detritos protegem o solo do impacto das chuvas torrenciais e favorecem a retenção do excesso de águas pluviais. Estes solos florestais permeáveis também favorecem maiores taxas de infiltração e capacidade de armazenamento, reduzindo a frequência e a intensidade das inundações. Qualquer atividade que expõe e compacta o solo (tais como desflorestamento, pastoreio, agricultura e incêndios florestais) reduz a função de proteção das florestas. Em geral, quanto mais alterações sofrer a floresta, maiores serão as possibilidades de erosão (FAO, 2005).

O produto da sedimentação é a eutrofização, contaminação química e assoreamento. Os sedimentos têm efeitos negativos ao serem transportados pela enxurrada e depositados nos canais, lagoas, lagos e represas. Podem prejudicar a vida aquática, diminuir a qualidade da água para uso doméstico ou industrial, reduzir a capacidade das barragens construídas para controle de inundações, geração de eletricidade, irrigação ou para a regulação dos fluxos, impedir navegação, encurtar a vida útil das turbinas ou bombas hidráulicas e assorear os leitos dos rios canalizados agravando as inundações. Daí a função protetora das florestas para reduzir a erosão ter um impacto significativo além do nível local, pois contribui na redução da sedimentação (FAO, 2005).

A vegetação tem impacto sobre a erosão aumentando a estabilidade dos agregados e a própria coerência do solo, protegendo-o do impacto das gotas d'água, incrementando a capacidade de infiltração e freando a enxurrada (THORNES, 1985). Nesta mesma direção, Calder (1999) sinala que pesquisas apontam as seguintes conclusões:

- a) a cobertura florestal diminui o escoamento da água das chuvas;
- b) existe evidencia ambígua a respeito do papel da cobertura florestal no controle do fluxo de água em períodos de secas;

- c) em princípio, os recursos florestais reduzem a erosão, mas depende das práticas de manejo florestal.

Barbosa e Fearnside (2000), em um estudo realizado entre agosto de 1988 e fevereiro de 1992, na região de Apiaú, no estado de Roraima, com o propósito de analisar a erosão do solo pela ação da água das chuvas em solos de pastagem e floresta primária, para um declive padrão de 20%, acharam que a erosão em solos de pastagem de *Brachiaria humidicola* foi 7,5 vezes maior comparado com os resultados obtidos para floresta, tal como se observa na Tabela 8.

Tabela 8 - Erosão do solo, escoamento superficial e precipitação pluviométrica nos sistemas de pastagem e floresta primária na região de Apiaú, Roraima, Brasil. Agosto de 1988 a fevereiro de 1992

Parâmetros	Floresta primaria	Pastagem (B. humidicola)
Precipitação (mm.ano ⁻¹)	1.538	2.109
Erosão (kg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	150	1.128
Escoamento superficial (milhões de litros.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	1,13	3,18

Fonte: Barbosa e Fearnside (2000).

Neil e Galloway, 1989 apud Mahmoudzadeh (2002), estudaram a sedimentação nos planaltos do sul do estado de New South Wales (NSW), na Austrália. Concluíram que a produção de sedimentos foi aproximadamente 2,8 vezes maior nas áreas cultivadas que na floresta nativa. Também, demonstraram que, nessa região, os pastos nativos produzem 3,8 vezes mais sedimentos que as florestas, pastos melhorados 5,4 vezes, pastoreio excessivo 27 vezes e plantações de pinus 38 vezes mais.

Figura 23 - Produção média anual de sedimentos para diferentes usos de solo na zona de Bathurst (New South Wales, Austrália)

Fonte: Mahmoudzadeh (2002).

Para Bishop e Landell-Mills (2003) o controle de erosão é mais um benefício para a bacia hidrográfica atribuído à floresta. Propõem que a infiltração da água da chuva é maior em florestas naturais e mistas o que permite a redução do escoamento superficial e da erosão. Além disso, acredita-se que as raízes das árvores travam o chão, reduzindo a vulnerabilidade do solo à erosão, especialmente em declives. A presença de árvores também pode ajudar a reduzir o impacto da chuva no solo e, consequentemente, o nível de deslocamento das partículas. Nesta direção, Stadtmuller (1994) lista os resultados de alguns estudos sobre a relação uso da terra e erosão (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores de escoamento superficial e erosão para diferentes usos da terra no trópico em diferentes sítios do mundo

Uso da terra	Sítio geográfico	Precipitação (mm.ano ⁻¹)	Declividade (%)	Escoamento superficial (% da precip)	Erosão (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
Floresta	Alto Volta	850	0,5	2	0,1
	Senegal	1.200	4	0,3	0,1
	Costa de Marfim	2.100	7	0,1	0,03
Culturas	Alto Volta	850	0,5	2,0 - 32	0,6 – 0,8
	Senegal	1.200	4	0,1 - 26	6,1 - 26
	Costa de Marfim	2.100	7	0,5 - 20	0,1 - 90
Solo descoberto	Alto Volta	850	0,5	40 - 60	10 - 20
	Senegal	1.200	4	15 - 30	18 - 30
	Costa de Marfim	2.100	7	38	108 - 170
	Colômbia	2.750	22	62	225,4

Fonte: Stadtmuller (1994).

3.4 Valores econômicos associados a ecossistemas florestais

O valor econômico de um produto ou serviço está baseado no valor que ele proporciona ao ser humano num determinado contexto. Assim, o valor econômico é uma noção antropocêntrica. Ela reflete a percepção e pode ser alvo de diferentes interpretações por pessoas diferentes. O valor deriva de uma função objetivo: o objetivo de maximizar o bem-estar humano, que reflete as preferências do indivíduo (MONTAGNÉ et al., 2008).

A ideia central da valoração econômica é a seguinte: se a maioria dos bens e serviços ambientais fornecidos pelos ecossistemas florestais não tem preço de mercado, mas são consumidos pelas pessoas, então eles têm um valor econômico. Nesse sentido, eles são consumidos livremente (já que não têm preço) e, como eles aumentam o bem-estar do consumidor, fazem parte da função de utilidade do indivíduo (portanto eles têm um valor). O valor econômico é a medida dessa alteração do bem-estar resultante do consumo do bem ou serviço (MONTAGNÉ et al., 2008).

Cristeche e Penna (2008) estudaram o paradigma do valor antropocêntrico do qual se derivam os métodos de valoração econômica, que geralmente classificam os bens e os serviços do ecossistema de acordo como eles são utilizados. Os bens e serviços ambientais podem possuir um valor diferente para distintos indivíduos e grupos de pessoas. A agregação dos valores marginais é o Valor Econômico Total. A terminologia e classificação dos distintos elementos que compõem o Valor Econômico Total variam ligeiramente entre analistas, mas geralmente incluem o Valor de Uso e o Valor de Não Uso. O Valor de Uso está composto por: (i) Valor de Uso Direto; (ii) Valor de Uso Indireto; e (iii) Valor de Opção. O Valor de Não Uso se associa habitualmente com o conceito de valor de existência.

Figura 24 - Categorias do valor econômico de um ecossistema florestal

Fonte: Baseado em FAO (1992).

No caso das florestas, valores de uso referem-se à vontade ou disposição de pagar para fazer uso direto ou indireto dos recursos florestais. A utilização direta pode

ser para consumo. Por exemplo, comércio de madeira e produtos florestais não madeireiros (mel, samambaias, cortiça, etc.), ou para a subsistência do indivíduo, por exemplo, lenha, cogumelos, caça de subsistência, vista paisagística, etc.

Outra fonte de valor são os de uso indireto relacionados com o fornecimento de bens e serviços através de processos naturais, tais como a capacidade de bacias hidrográficas para manter a qualidade da água, a capacidade da floresta de armazenar carbono, a capacidade das zonas úmidas para fornecer habitat às espécies. Assim, concretamente, os serviços ambientais relacionados com controle de erosão e sedimentos estão classificados na categoria de valores de uso indireto.

Valores de opção consistem na vontade das pessoas de pagar para conservar a possibilidade (ou opção) de um uso futuro de um bem ou serviço, sem que elas tenham certeza sobre a realização efetiva dessa utilização. Um exemplo de valores de opção é o valor de proteção da floresta para preservar a possibilidade de extrair material genético para produtos farmacêuticos (MONTAGNÉ et al., 2008).

Segundo Howarth e Farber (2002), uma ideia heurística do problema da valoração dos ecossistemas pode ser obtida a partir do modelo simplificado apresentado na Figura 12, que mostra os benefícios marginais (BMg) derivados da provisão de um serviço ambiental (S).

Figura 25 - Ilustração gráfica do valor dos serviços ambientais

Fonte: Adaptado de Howarth e Farber (2002).

Poderíamos interpretar S em termos de fluxos de extração de um recurso biológico como peixes, madeira ou produtos agrícolas. Alternativamente, S poderia refletir o nível dos serviços de recreação ou lazer associado às florestas, o valor de existência de um ecossistema único em perigo de extinção ou qualquer outro serviço ambiental. Em qualquer caso, se assumimos que BMg é uma medida dos benefícios líquidos derivados do meio ambiente, segundo o padrão dos argumentos microeconômicos, os benefícios totais derivados de um determinado nível de serviços (S_0) é medido pela área abaixo da curva de benefícios marginais:

$$B(S_0) = \int_0^{S_0} BMg(S) dS$$

Neste nível da oferta, o preço sombra (P_0) representa a contribuição marginal dos recursos naturais na satisfação das preferências humanas expressas em unidades monetárias. Este preço sombra pode ser estimado utilizando as conhecidas ferramentas de valoração de não-mercado (PEARCE, 1993 apud HOWARTH; FARBER, 2002).

4 FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

Existe abundante literatura sobre as metodologias de valoração econômica de bens e serviços ambientais e uma quantidade importante de aplicações de algumas delas, mas para o caso específico da função de controle de erosão e sedimentos associados à floresta, os exercícios de valoração econômica são relativamente escassos. Nesta seção será feita uma descrição geral das metodologias mais usadas na valoração de recursos naturais e ambientais, e serão apresentados alguns resultados de aplicações econômicas relacionadas com os serviços de controle de erosão e sedimentos.

4.1 Metodologias de valoração de recursos naturais e ambientais

Atualmente, sabe-se que recursos naturais como florestas, recursos pesqueiros, depósitos de minerais e atributos ambientais como qualidade do ar ou qualidade da água produzem importantes fluxos de bens e serviços. O equilíbrio desses fluxos de bens e serviços pode ser afetado de maneira significativa por qualquer projeto ou política que desenvolva o Governo e o setor privado. Os impactos gerados sobre o meio ambiente se traduziriam em mudanças de bem-estar para a sociedade na forma de custos e benefícios econômicos (MENDIETA, 2001).

As metodologias para valoração econômica dos recursos naturais e ambientais fundamentam-se na teoria econômica clássica de medição de mudanças nos preços e quantidades de bens comprados nos mercados convencionais. Aplicando uma série de extensões a estas metodologias é possível valorar bens com características de bens públicos e sem mercado tais como os bens ambientais. Esta teoria assume que as pessoas conhecem suas preferências, e que essas preferências têm a propriedade de substituíbilidade entre bens de mercado e os “não-mercado”. A substituíbilidade estabelece uma taxa de troca (*trade off*) entre pares de bens, fazendo que esta seja a essência do conceito econômico de valor (MENDIETA, 2001).

Os economistas têm desenvolvido uma variedade de técnicas de valoração que podem ser divididas em três categorias (AUSTRALIAN GOVERNMENT DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND HERITAGE, 2005):

- *técnicas baseadas no mercado*: envolve a procura de “sinais” no mercado deixadas pelo bem ou serviço ambiental, mesmo que ele não seja comprado e vendido diretamente. Alguns produtos do ecossistema, como a madeira, são comercializados nos mercados. Assim, seus valores podem ser calculados pela estimativa de consumo e excedente do produtor, como em qualquer outro bem de mercado;
- *técnicas baseadas em preferências reveladas*: esta abordagem também utiliza o comportamento real das pessoas e o dinheiro realmente gasto por elas, para ter uma idéia sobre o valor do serviço. Por exemplo, a quantidade que as pessoas pagam para tratar a água em áreas similares às protegidas pelas florestas pode ser usada para estimar a disposição a pagar pelos serviços de purificação de água das florestas;
- *técnicas baseadas em preferências declaradas*: consiste em perguntar diretamente às pessoas quanto estão dispostas a pagar por alguma coisa. Esta abordagem é também chamada de “preferências expressadas” porque os indivíduos indicam diretamente quanto estão dispostos a pagar. É uma técnica capaz de capturar o valor dos serviços florestais que não são negociados nos mercados, e não estão intimamente relacionados com as mercadorias comercializadas. Comportamentos reais não são observáveis, assim, são utilizados questionários para perguntar diretamente às pessoas o que eles estão dispostos a pagar, tomando como base um cenário hipotético.

As técnicas de valoração econômica podem ser agrupadas de acordo à origem da informação e complexidade na estimação do valor monetário (Figura 26), o que guarda relação com as três categorias acima descritas. Outra forma de agrupar as técnicas de valoração econômica é de acordo com o tipo de valor que se deseja estimar, o que oferece uma ideia mais clara para seleção da metodologia adequada,

qualquer que seja o caso (Tabela 10). Assim, para estimação de valores de uso direto e indireto há disponível uma maior diversidade de técnicas, enquanto que para valores de não uso as possibilidades de escolha de técnicas tornam-se muito mais reduzidas devido à sua complexidade.

Em suma, os recursos naturais têm usos diferentes que estão associados com valores diferentes, que muitas vezes o mercado não é capaz de capturar. Portanto, neste contexto, é fundamental a utilização de metodologias alternativas de valoração econômica de recursos naturais. Embora a crescente literatura sobre este tema possa dar a impressão de que existe uma atividade considerável na aplicação real destes métodos, na prática esta é ainda muito limitada. A maioria dos textos foca nas metodologias, aplicações hipotéticas, análise de outros trabalhos, ou aplicações parciais (FAO, 1995).

Figura 26 – Classificação das metodologias de valoração econômica de bens e serviços ambientais de acordo com a origem da informação usada na estimação do valor monetário

Fonte: Millennium Ecosystem Assessment (2003), Universidad de los Andes (No prelo).

⁽¹⁾ Pertencem à categoria das técnicas de mercado e utilizam custos reais ou potenciais de uma atividade econômica para estimar o valor monetário de um serviço ambiental relacionado.

Tabela 10 - Metodologias de valoração econômica de recursos naturais segundo o tipo de valor a ser calculado

Tipo de valor a ser estimado	Metodologias de valoração
Valor de Uso Direto	<ul style="list-style-type: none"> - Análise de mercado - Mercados simulados - Função de produtividade - Descriminação do orçamento - Custo - eficácia - Gastos defensivos - Programação matemática - Programação linear - Programação quadrática - Custo de viagem - Renda líquida do recurso
Valor de Uso	<ul style="list-style-type: none"> - Preços hedônicos - Custo evitado - Referendo - Custo de oportunidade - Custo conservação - Custo de prevenção de danos - Alterações na produtividade - Custo de restauração - Diferencial de salários - Projeto sombra - Valoração contingente - Eleição contingente
Valor de Uso Indireto	
Valor de Opção	<ul style="list-style-type: none"> - Valoração contingente - Eleição contingente
Valor de Nao Uso Valor de Existência	<ul style="list-style-type: none"> - Valoração contingente - Eleição contingente
Métodos Integrais de Valoração	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação multicritério - Transferência benefícios - Coeficientes integrais

Fonte. Adaptado de Lomas et al. (2005).

4.2 Valor econômico do impacto das florestas na redução de sedimentos

O conhecimento e compreensão das funções das florestas tropicais são muito limitados, portanto, existe ainda uma considerável incerteza sobre a dinâmica do ecossistema florestal, sobretudo no tocante às florestas tropicais. Esses processos são interativos, complexos e insuficientemente compreendidos em florestas tropicais. E, o conhecimento sobre a relação entre economia e meio ambiente é ainda mais pobre. Esta falta de informação sobre tais parâmetros de interação e valores básicos representa uma dificuldade para escolha do uso apropriado ou combinação de usos

que poderia render o máximo valor social para uma área particular de floresta (KENGEN, 1997).

A valoração adequada dos recursos florestais pode fornecer informação útil a todos os associados, para escolhas entre opções de gestão e usos alternativos das florestas e terras e, assim, satisfazer as necessidades de grupos envolvidos. Pode contribuir para mostrar que o uso sustentável da floresta tem um valor econômico positivo, e que este valor econômico pode ser ainda maior do que o valor de usos alternativos do recurso que o ameaçam. No entanto, a valoração econômica é incapaz de informar sobre as motivações das pessoas no uso das florestas.

A valoração econômica é uma ferramenta que pode aumentar o conhecimento da gama de valores monetários associados com florestas. Espera-se que uma valoração adequada deva ser capaz de mudar a percepção sobre os recursos florestais e, conseqüentemente, influenciar decisões que permitam um uso mais racional dos recursos florestais, caso contrário a valorização da floresta pode ser um desperdício de esforços (KENGEN, 1997). Segundo este autor as florestas têm certos atributos que justificam uma avaliação mais completa:

- a) particularmente nos países em desenvolvimento, muitos dos produtos florestais, como lenha e produtos não-madeireiros da floresta (PFNM) são usados principalmente em uma base de subsistência;
 - b) uma percentagem particularmente significativa dos serviços ambientais das florestas não entra no mercado;
 - c) as externalidades são particularmente importantes na silvicultura - alguns benefícios importantes das florestas não são capturados no interior ou mesmo perto da floresta, mas sim em sítios mais distantes e normalmente a nível global;
- e,

- d) os benefícios que a floresta acumulará com as gerações futuras podem ser significativos, portanto, deveriam ser tomados em conta no planejamento dos usos atuais.

Mesmo havendo uma considerável falta de dados sobre as muitas funções e valores dos ecossistemas naturais, as decisões relacionadas com o uso da terra são tomadas sobre a base de informação incompleta. Contudo, algumas aplicações de valoração econômica na área de recursos naturais têm sido feitas, pois a importância de um determinado bem ou serviço deve ser medido em termos monetários (DE GROOT, 2006). Assim, a valoração econômica de recursos naturais é necessária para atingir dois objetivos: eficiência econômica e crescimento sustentável.

Existem outras ideias argumentando que os ecossistemas devem ser protegidos por razões puramente morais ou estéticas, sem a dependência única de avaliações econômicas. Argumentos morais traduzem a valoração e decisão do problema em um conjunto de diferentes dimensões e uma diferente linguagem de discurso. Mas a moral e argumentos econômicos certamente não são mutuamente exclusivos. As duas discussões podem e devem andar em paralelo (CONSTANZA et al., 1997). Este mesmo autor, fazendo um resumo do valor médio global de ecossistemas florestais, estima que o valor do serviço de controle de erosão está próximo de USD 96,00 por hectare por ano.

Para o serviço de controle de erosão em florestas do Estado de Mato Grosso, no Brasil, Seidl e Moraes (2000) estimaram um valor de USD 63,41 por hectare. Enquanto que, para florestas do Equador, Cornejo e Barrezueta (2003) estimaram um valor de USD 54,80 por hectare por ano. Para esse mesmo serviço da floresta, Curtis (2004), em um estudo de valoração de bens e serviços ambientais, realizado em Queensland, na Austrália, achou valores econômicos variando entre USD 14,84 e USD 16,26 por hectare por ano dentro das florestas estatais. Dentro de parques nacionais, esse valor foi estimado em torno de USD 12,42 e USD 13,37 e para terras sem direitos de propriedade esse valor esteve apenas entre USD 1,91 e USD 2,45.

Moskowitz e Talvern, 1998 apud KRIEGER (2001), revisaram vários estudos sobre custos associados ao desmatamento, para várias regiões, incluindo custos

atribuíveis a erosão por desmatamento induzido. Alguns desses estudos revisados por Moskowitz e Talvern (1998) relacionam-se com custos associados à sedimentação, como é o caso da bacia do rio Little Tennessee, onde o custo de sedimentação atingiu uma média de USD 1,94 por tonelada de sedimento. No Willamette Valley de Oregon, com uma grande extensão de terras de florestas nacionais, a sedimentação atingiu custos totais de USD 5,5 milhões anuais⁹. Um resumo de resultados de valor econômico, encontrados por diversos pesquisadores para as funções de controle de erosão e sedimentos se apresenta na Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo do valor econômico das florestas no controle da erosão e sedimentos, encontrado por diversos estudos

Estudo	Descrição	País	Tipo de função de proteção de bacias	Valor (USD/ha)
Bann, 1998	Valoração econômica de florestas na proteção de bacias	Turquia	Redução da erosão de solos	46,00
Senci3n, 2002	Valoração econômica de floresta tropical	Guatemala	Redução da erosão de solos	463,00
Briones, 1991	Manejo da vegetação e florestas em áreas próximas a regos	Filipinas	Redução de sedimentos	68,00 - 586,00
Cruz et al., 1988	Análise ex post do conversão de florestas para pastagem e culturas	Filipinas	Redução da erosão e sedimentos	15,00
Veloz et al., 1985	Efeitos do reflorestamento de áreas de cultura e pastagens	República Dominicana	Redução da erosão e sedimentos	2.063,00
Cornejo e Barrezueta, 2003	Valoração econômica de usos do solo	Equador	Redução da erosão de solos	54,80
Curtis, 2004	Valoração de bens e serviços ambientais em florestas nativas	Australia	Redução da erosão de solos	1,91 - 16,26
Seidl e Moraes, 2000	Valoração de serviços ambientais de ecossistemas	Brasil	Redução da erosão de solos	63,41
Constanza et al., 1997	Resumo de estudos de valoração de serviços ambientais da floresta	—	Redução da erosão de solos	96,00

Fonte: Pearce (2001), Chomitz e Kumari (1998), Senci3n (2002) e Constanza et al (1997).

Devido ao fato que o processo de retenção e deposição de sedimentos é complexo, pode haver diferenças significativas nas cargas de sedimentos ao longo do trecho percorrido, podendo ser substancialmente mais baixas em grandes bacias hidrográficas. O efeito das florestas na redução de sedimentos nas bacias é variável e, assim, as pesquisas diferem sobre a influência da floresta, embora haja um consenso

⁹ Neste caso, o estudo não indica o custo por hectare de floresta.

geral de que as florestas desempenham um papel protetor importante (PATTANAYAK, 2004).

5 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a descrição da metodologia e dos procedimentos utilizados para a o cálculo do valor econômico do serviço ambiental de redução de sedimentos associado às florestas da bacia do Canal do Panamá e, adicionalmente, detalhes relacionados com a informação utilizada e sua fonte.

5.1 Metodologia de valoração econômica

O valor associado ao serviço de controle de sedimentos é classificado como um valor de uso indireto da floresta. Chama-se valor de uso indireto porque o agente beneficiário, neste caso ACP, não entra em contato direto com a floresta, mas utiliza um dos serviços produzidos por ela: a redução de sedimentos. Assim, para este estudo foi escolhida a metodologia de **custo evitado**, especificamente custo evitado de dragagem.

Vários autores como Freeman (1993); Beecher (1996); Cancino e Donoso (2001) e outros identificam custos evitados como uma metodologia apropriada para valoração econômica de serviços ambientais, tais como os relacionados com a proteção de bacias hidrográficas. A metodologia de custo evitado refere-se à aplicação da metodologia benefício-custo tradicional, segundo o qual, do ponto de vista teórico, em toda alternativa de investimento existe um custo de oportunidade do capital, o que implica considerar como custo “todo benefício não recebido” e como benefício “os custos evitados” (SÁNCHEZ; LEDESMA, 2003).

A aplicabilidade do princípio de custo evitado se estende muito além de desenhar e justificar a gestão da demanda (BEECHER, 1996). Custos evitados são, de fato, utilizados para avaliar os benefícios de diferentes alternativas de gestão de questões complexas como gestão integrada de recursos naturais, tanto do lado da oferta como do lado da demanda. Para este mesmo autor, em teoria, os custos evitados podem se dividir em três tipos:

- a) os custos diretos (custos de capital e custos operativos);

- b) os custos indiretos¹⁰; e,
- c) os custos de oportunidade¹¹.

A maioria dos estudos de custo evitado enfatiza os custos diretos associados com as alternativas de uso do recurso, pois são mais fáceis de medir, analisar e comparar (BEECHER, 1996). Os custos diretos incluem os custos associados ao cancelamento ou adiamento no tempo de investimentos de capital (incluindo o custo financeiro dessas operações, sujeito a ser analisado sob a perspectiva de retorno financeiro), bem como custos de operação e manutenção (CEPAL, 2008). Custos de dragagem são custos de manutenção e, portanto, podem ser classificados como custos diretos.

Conceitualmente, o objetivo da análise de custo evitado é ajudar os administradores a aproveitar as oportunidades de menor custo. Uma análise de custo evitado proporciona um espectro mais amplo de possibilidades e ajuda a pensar em alternativas num processo de planejamento tradicional (BEECHER, 1996).

Os custos evitados indiretos podem ser também medidos em termos do meio ambiente. Os custos e benefícios da natureza são, talvez, os mais difíceis de quantificar. A incorporação das externalidades (ou efeitos secundários) do meio ambiente no planejamento e nos preços de serviços públicos e privados é objeto de controvérsia. Contudo, o custo no longo prazo do esgotamento dos recursos naturais não pode ser ignorado. Florestas e água são recursos naturais abundantes em alguns aspectos, mas também são finitos. Seu uso e transformação têm consequências ambientais de magnitude e permanência variáveis no tempo e espaço. A sua crescente escassez levará ao aumento dos custos ambientais.

Porém, a avaliação destes custos evitados não é um desafio fácil. Devem ser atendidas numerosas questões analíticas essenciais, que se refletirão nos

¹⁰ São os custos que não se podem apropriar diretamente a cada tipo de bem ou função de custo no momento de sua ocorrência. Exemplo: externalidades e custos decorrentes.

¹¹ Representam os custos associados a uma determinada escolha, medido em termos da melhor oportunidade perdida.

pressupostos que o analista adote para resolver essa avaliação. O primeiro aspecto é o perfil temporal a considerar, pois tanto os fluxos de custos como de benefícios se distribuem no tempo. Por exemplo, um esforço de investimento concentrado no presente, poderia ser compensado por poupanças em longo prazo no futuro (CEPAL, 2008).

O método do custo evitado pode ser utilizado para avaliar o valor de uso direto e o valor de uso indireto (como é o caso do serviço de controle de sedimento das florestas), categorias de valor que formam parte do Valor Econômico Total de um recurso natural. Custo evitado pode ser aplicado ao caso típico em que o bem ou serviço ambiental sob análise não é comercializado no mercado, mas está relacionado com um bem que é comercializado, ou seja, que tem um preço e onde a ligação entre os dois está em serem substitutos no âmbito de uma função de produção determinada (CRISTECHE; PENNA, 2008). Para esses autores, neste contexto admitem-se duas possibilidades:

- a) o bem ou serviço ambiental é um insumo a mais na função de produção de um bem ou serviço privado;
- b) o bem ou serviço ambiental, juntamente com outros bens e serviços, faz parte da função de utilidade de um indivíduo ou família.

No contexto do Canal do Panamá, os custos evitados são as poupanças associadas à não realização ou redução da dragagem, como resultado do fato que a cobertura florestal reduz a produção de sedimentos. Em outras palavras, o serviço ambiental (redução da sedimentação) das florestas é considerado substituto de atividades de dragagem que, adicionalmente, deveriam ter sido feitas caso não existissem as florestas. Na prática, haveria um aumento da renda total (e marginal) do Canal, decorrente da redução de custos de dragagem atribuíveis a esse serviço da floresta. Desta forma, se o valor monetário do serviço florestal de controle de sedimento está relacionado com reduções de custos de dragagem, esse valor pode ser estimado.

Assim, o cálculo do custo evitado anual por redução de sedimentos, atribuível à floresta da bacia, pode ser representado pela seguinte equação:

$$Cde = (Cd * Vsrh) * H \quad (1)$$

Em que:

- a) Cde é o custo evitado de dragagem por ano pela floresta da bacia do Canal;
- b) Cd o custo de dragar um metro cúbico de sedimentos no Canal do Panamá;
- c) $Vsrh$ o volume de sedimento anual reduzido por hectare de floresta, em metros cúbicos; e,
- d) H o número de hectares de floresta da bacia do Canal.

O custo de dragagem por metro cúbico (Cd) pode ser obtido da ACP. Adicionalmente, atividades de dragagem no Canal são realizadas por companhias privadas que devem concorrer pela contratação e, portanto, devem apresentar propostas de orçamento que estabelecem o custo de dragagem por metro cúbico de sedimentos. Complementarmente, a partir do custo evitado de dragagem por ano pela floresta (Cde) pode ser calculado o valor presente desse custo para o período de estudo 1999-2009. Neste caso o cálculo pode ser expresso por:

$$VP = \sum_{t=0}^{10} Cde_t * (1 + r)^{10-t} \quad (2)$$

Em que:

- a) VP é o valor presente do custo evitado de dragagem pela floresta da bacia no período 1999–2009;
- b) Cde_t o custo evitado de dragagem pela floresta da bacia no ano t ;
- c) r a taxa de desconto de 8% ; e,
- d) t o tempo em anos, $t = 0$ (1999) até $t=10$ (2009).

Na prática, a aplicação da metodologia de custo evitado para estimar o valor econômico do serviço ambiental das florestas pela redução de sedimentos na bacia do Canal do Panamá implica duas etapas básicas descritas a seguir.

5.1.1 Impacto físico da cobertura florestal sobre a produção de sedimentos

Esta etapa analisa, estatisticamente, os dados de sedimentos produzidos anualmente como uma variável dependente da cobertura florestal, precipitação e outras variáveis das microbacias para o período 1999–2009. O propósito é determinar o impacto da cobertura florestal sobre a produção sedimentos (V_{srh}). Essa relação de variáveis pode ser representada da seguinte forma:

$$\textit{Produção de sedimentos} = f(\textit{precipitação, cobertura florestal e outras características da microbacia}) \quad (3)$$

Como se trata de um conjunto de sete microbacias e um horizonte de tempo de 11 anos, os dados foram organizados em uma matriz ou painel de dados (Anexo B). Dados em painel permitem que o impacto de mudanças que ocorrem nas variáveis tanto entre as microbacias como internamente à cada uma delas (ao longo do tempo) fique mais bem refletido na análise estatística. Embora, a maioria das variáveis se alteram entre as microbacias, mas são constantes no tempo dentro da mesma microbacia.

Devido que as superfícies das microbacias do Canal são diferentes é necessário, nesta etapa, normalizar os dados de produção de sedimentos e cobertura florestal a unidades que permitam a comparação entre uma e outra microbacia e também para análise dos resultados. Por esse motivo, os dados de produção de sedimentos e cobertura florestal são apresentados, respectivamente, em toneladas por $\text{km}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ e porcentagem.

5.1.2 Valor econômico do serviço ambiental da floresta na redução de sedimentos

A cobertura florestal e a produção de sedimentos devem ser inversamente relacionadas. De acordo com a teoria, é possível estimar o seu valor econômico por hectare de floresta. Como o custo de dragagem por unidade de volume de sedimento no Canal de Panamá é conhecido, a estimação desse valor econômico é obtida pelas equações (1) e (2). Concretamente, o valor econômico do serviço de redução de sedimentos de um hectare de floresta pode ser estimado multiplicando a quantidade de sedimento que reduz esse hectare pelo custo de dragagem de uma unidade de sedimento. De acordo com os argumentos teóricos, num cenário sem florestas na bacia do Canal, a quantidade de sedimentos que precisariam ser dragados seria maior que no cenário atual de cobertura florestal e conseqüentemente os custos de dragagem também. Portanto, esse custo de evitar dragagens adicionais corresponde ao valor econômico atribuível ao serviço de redução de sedimentos da floresta.

5.2 Fonte e característica da informação utilizada

Grande parte da informação utilizada neste trabalho de pesquisa foi fornecida pela Autoridade do Canal do Panamá – ACP, que possui uma rede de 59 estações hidro-meteorológicas, a maioria telemétricas, que em tempo real registram e transmitem dados de diferentes parâmetros: elevação dos rios (11), elevações dos lagos (9), níveis das marés (2), precipitação pluvial (55), temperatura do mar (2) e dados meteorológicos como temperatura do ar, velocidade e direção do vento, umidade relativa, radiação solar total e pressão barométrica (13). Similarmente, na região da bacia do Canal, são realizadas medições mensais de vazão em dez estações e medição de sedimentos suspensos em sete. Adicionalmente, vários parâmetros de qualidade da água são monitorados em 26 pontos permanentes localizados diversos pontos em rios e lagos.

Assim, para o período 1999-2009, os dados utilizados para esta análise, especialmente precipitação e produção de sedimentos, foram obtidos dos registros

dessas estações hidro-meteorológicas para as sete microbacias que constituem a área geográfica de estudo (Chagres, Pequení, Boquerón, Gatún, Trinidad, Cirí Grande e Caño Quebrado). Como já indicado, elas representam 40% da área total da bacia.

Uma parte importante da informação gerada nas estações hidro-meteorológicas é publicada anualmente no “Anuário Hidrológico” da ACP, que é de acesso público. A ACP também forneceu os seguintes dados:

- i) declividade média das microbacias;
- ii) cobertura vegetal e outros usos do solo para 1999, 2004 e 2008¹²;
- iii) escoamento superficial, vazão e concentração de sedimentos;
- iv) dragagem de sedimentos no período 1990-2009; e;
- v) outras informações tomadas de registros e estudos específicos nesses temas, tais como dados socioeconômicos, características geográficas das microbacias e custos de dragagem.

Como a informação de cobertura florestal fornecida por ACP era insuficiente, um estudo mais completo foi contratado junto ao Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal de Pelotas, que adicionalmente incluiu estimações de declividade média para as microbacias.

A seguir, é feita uma descrição mais detalhada dos dados usados na análise:

a) *Produção de sedimentos*: é medida como a vazão de sólidos em suspensão que passam numa determinada seção do rio num intervalo de tempo. Assim, a produção de sedimentos é medida na saída de cada microbacia e expressa em toneladas (ou metros cúbicos) por ano (Tabela 12). Se dividida pela área da bacia, pode ser expressa em toneladas ou metros cúbicos por hectare ou quilômetro quadrado. A transformação de peso em volume é feita dividindo-se os valores coletados pela densidade dos sedimentos. A medição da vazão de sólidos em suspensão parte da medição prévia da

¹² Esta informação não foi utilizada no trabalho, já que foi realizado um estudo mais completo sobre o tema.

concentração dos sedimentos em suspensão em amostras de água, expressa em miligramas por litro;

Tabela 12 - Registros da produção anual de sedimentos, em $t.km^{-2}$, para as sete microbacias, no período entre 1999 e 2009

Ano	Microbacia							Média ponderada
	Chagres	Pequení	Boquerón	Gatún	Trinidad	Cirí Grande	Caño Quebrado	
1999	357,00	576,00	635,00	505,00	192,00	148,00	<u>133,04</u>	349,88
2000	718,00	417,00	350,00	294,00	82,00	71,00	<u>88,06</u>	369,63
2001	91,00	317,00	327,00	105,00	51,00	63,00	<u>77,21</u>	128,35
2002	236,00	658,00	428,00	114,00	178,00	128,00	<u>116,20</u>	259,36
2003	64,00	253,00	194,00	219,00	251,00	147,00	115,00	159,04
2004	80,50	798,00	891,00	350,00	116,00	54,00	90,00	264,75
2005	76,60	57,84	209,31	97,53	92,28	47,93	89,86	85,33
2006	657,44	633,71	585,87	394,10	322,76	425,09	139,37	503,54
2007	1.639,89	1.321,21	870,76	641,56	270,55	306,42	256,08	932,99
2008	230,27	539,02	300,78	294,69	169,71	128,07	71,74	246,80
2009	564,45	1.079,03	1.045,51	416,95	180,55	109,01	117,72	494,96

Fonte: ACP (Anuários Hidrológicos 2000 – 2010).

Nota: A microbacia do rio Caño Quebrado não dispõe de medições de produção de sedimentos para o período 1999-2002. Os dados para esse período (sublinhados) foram estimados por regressão.

b) *Precipitação*: a precipitação é medida em milímetros (mm) e equivale à lâmina de água que se formaria sobre uma superfície plana e impermeável (Tabela 13). Para o caso das sete microbacias envolvidas neste estudo, existem dados diários, mensais e anuais de precipitação. Na bacia do Canal do Panamá as chuvas são abundantes com média anual acima de 3.000 mm e ocorrem de forma mais intensa na segunda metade do ano, especialmente nos meses de novembro e dezembro. A precipitação é uma variável importante na geração de sedimentos, pois as características relacionadas com a quantidade, intensidades e concentração agem de diferentes formas e magnitude nesse processo;

Tabela 13 - Registros da precipitação anual, em milímetros, para as sete microbacias analisadas, no período entre 1999 e 2010

Ano	Microbacia							Média ponderada
	Chagres	Pequení	Boquerón	Gatún	Trinidad	Cirí Grande	Caño Quebrado	
1999	3.870,96	4.846,32	4.526,28	4.273,13	3.129,28	3.422,65	2.430,78	3.818,69
2000	3.940,18	3.905,25	3.685,54	3.824,39	2.476,08	2.606,46	2.212,34	3.364,90
2001	3.003,55	3.649,13	3.145,37	2.978,57	2.054,01	2.269,07	1.590,04	2.749,07
2002	3.327,40	4.037,75	3.203,79	2.991,27	2.475,65	2.741,51	2.161,54	3.081,97
2003	3.586,48	3.855,72	3.468,79	3.549,23	2.631,44	2.894,75	2.301,24	3.275,77
2004	3.719,20	4.571,15	4.185,07	3.726,18	2.127,67	2.168,31	1.925,32	3.267,71
2005	3.095,63	3.586,48	2.931,16	3.046,31	2.367,28	2.335,11	1.986,28	2.842,09
2006	3.886,84	4.326,47	3.862,49	3.447,63	2.711,03	2.853,27	2.222,50	3.453,76
2007	3.798,99	4.662,97	4.267,14	3.763,35	2.664,24	2.878,16	2.831,16	3.564,03
2008	3.367,75	3.470,33	3.112,67	2.873,00	2.128,33	2.333,00	1.931,00	2.871,03
2009	3.887,25	4.602,00	4.268,67	3.614,00	2.245,33	2.383,33	1.926,00	3.373,51
2010	4.700,75	5.519,33	5.126,00	4.857,67	2.978,33	3.214,33	2.557,00	4.227,19

Fonte: Dados fornecidos pela ACP (2011).

Nota: Estes dados de precipitação correspondem a média aritmética de estações hidro-metereológicas de cada microbacia.

c) *Cobertura florestal*: é a superfície que, dentro de cada microbacia, contém floresta em qualquer estado de desenvolvimento (jovem, secundária ou madura). Normalmente, esta variável é expressa em hectares, quilômetros quadrados ou em porcentagem em relação à superfície total da microbacia, como é caso do presente trabalho (Tabela 14). A cobertura florestal é a variável de interesse central neste estudo, pois é o seu efeito sobre a redução de sedimentos que se deseja conhecer e valorar economicamente. Assim, devido à limitada informação florestal que estava disponível era necessário realizar uma estimação mais detalhada da cobertura florestal. Isto foi possível graças à colaboração da Universidade Federal de Pelotas, como já foi citado. A Universidade realizou um estudo de classes de uso do solo nessas sete microbacias, utilizando 78 imagens (órbita/ponto 12/54) TM e ETM+ da série Landsat nas bandas 3 (vermelho - 630 a 690nm), 4 (infravermelho próximo – 750 a 900nm) e 5 (infravermelho médio – 1550 a 1750nm). Toda essa série de imagens foi obtida do acervo do United States Geological Survey (USGS). A partir das bandas de 4, 5 e 3 de

uma imagem do ano 2000 uma classificação automática foi gerada dando origem a um mapa com 54 classes. Posteriormente, essas classes foram reclassificadas com a edição manual reduzindo para quatro classes de uso do solo e uma a mais para a região não mapeada: floresta, pastagem, agricultura, solo exposto, região coberta por nuvem;

Tabela 14 – Estimativa da cobertura florestal para as sete microbacias analisadas, em porcentagem da área, expressa como porcentagem, para o período 1999-2010

Ano	Microbacia							Média ponderada
	Chagres	Pequení	Boquerón	Gatún	Trinidad	Cirí Grande	Caño Quebrado	
1999	97,41	96,65	69,61	37,32	44,19	40,06	20,02	67,18
2000	97,23	97,91	68,52	29,39	48,34	38,81	17,60	66,70
2001	97,10	97,98	68,39	27,90	45,03	35,14	15,81	65,30
2002	97,05	95,85	68,54	27,15	40,90	35,00	15,26	64,26
2003	97,01	97,02	69,04	27,02	42,00	36,00	14,47	64,71
2004	96,87	96,92	68,11	25,27	40,58	32,58	13,94	63,60
2005	96,83	96,61	67,83	24,42	37,58	32,32	13,64	62,92
2006	96,79	96,60	67,36	23,59	35,14	33,21	13,76	62,56
2007	96,66	96,45	67,41	22,67	29,83	32,90	13,87	61,55
2008	96,54	96,32	67,40	22,50	28,75	31,58	12,25	61,00
2009	96,57	94,33	66,55	21,70	28,87	32,67	11,53	60,76
2010	96,54	94,10	66,51	21,70	22,81	33,14	11,33	59,86

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

d) *Área da microbacia*: é o espaço de território ocupado por cada microbacia, expresso em hectares ou quilômetros quadrados (Tabela 15). As microbacias que compõem a bacia hidrográfica do Canal são relativamente pequenas se comparadas com as bacias de outros rios do Panamá e de outros países, mas são heterogêneas quanto a seu tamanho, pois a maior delas cobre um território que é seis vezes mais extenso que a menor, 41.400 e 6.700 há, respectivamente. Para essa análise, as áreas usadas correspondem especificamente às áreas com medição hidrométrica, que são em média 12 % menores que as áreas totais das microbacias (Anexos H - N);

e) *Declividade*: refere-se às inclinações da superfície do relevo das microbacias, que são expressas em graus ou porcentagem. Quando expresso em porcentagem, indica a altitude em metros que atingimos por cada cem metros que caminhamos horizontalmente. Para cada uma das sete microbacias foi usada a declividade média que é constante dentro de cada microbacia e varia apenas de uma para outra em intervalo de 6,04 e 23,68%, ou seja, entre 3,46 e 13,32 graus, que foi a unidade usada. As microbacias do lado leste do Canal apresentam um relevo com maior declividade com relação às do lado oeste;

f) *Forma da bacia*: refere-se à forma geométrica da microbacia. No conjunto de microbacias, predominam as formas alongadas (Gatún, Trinidad e Cirí Grande) e arredondadas (Chagres, Pequení, Boquerón e Caño Quebrado). No modelo estatístico, a forma é representada pelo fator dimensional de Horton (R_f) que estabelece a relação entre a área da bacia e o seu comprimento sendo representado pela equação: $R_f = (A/L^2)$, em que A representa a área da bacia e L o seu comprimento ou longitude. Segundo esta equação, na medida em que a área aumenta, a relação A/L^2 diminui indicando uma tendência de alongamento em bacias grandes. O fator de Horton varia entre 0,172 e 0,514 para as microbacias de Cirí Grande e Boquerón, respectivamente (Tabela 15);

g) *Densidade de drenagem*: é uma variável que indica a quantidade de leitos ou canais de escoamento de água por unidade de área para uma determinada bacia hidrográfica. Para as microbacias do Canal do Panamá a densidade de drenagem é expressa em quilômetros de canais de escoamento por quilômetro quadrado de área, variando entre 1,34 km.km⁻² na microbacia do rio Cirí Grande e 2,27 km.km⁻² na microbacia do rio Pequení (tabela 15);

h) *Comprimento do leito principal*: é a distancia percorrida pelo leito do rio principal de cada microbacia, desde sua saída até a nascente, seguindo o seu contorno. Na bacia do Canal do Panamá, os rios são muito pequenos e, no caso das sete microbacias da

análise, os comprimentos dos leitos dos rios variam apenas entre 19,7 km no rio Caño Quebrado e 48,3 km no rio Chagres (Tabela 15);

i) *Estrutura de drenagem*: define a forma ou padrão de configuração da rede de canais que recolhem as águas de toda a bacia. Nas microbacias do Canal do Panamá predomina o padrão de drenagem dendrítico caracterizado por um leito principal com seus afluentes primários e secundários se unindo ao longo do percurso. Em algumas microbacias, o padrão de drenagem se aproxima mais à configuração retangular e paralela (Tabela 15);

Tabela 15 - Dados da área com medição hidrométrica, declividade média, densidade de drenagem, comprimento do leito principal, fator de forma e estrutura de drenagem das sete microbacias

Variável	Microbacia						
	Chagres	Pequení	Boquerón	Gatún	Trinidad	Cirí Grande	Caño Quebrado
Área de drenagem (km ²) (1)	414,00	135,00	91,00	117,00	174,00	186,00	67,00
Declividade média (Graus)	13,32	11,42	12,41	11,08	10,15	9,71	3,46
Densidade de drenagem (km.km ⁻²)	2,22	2,27	1,99	2,26	1,44	1,34	1,96
Comprimento do leito principal (km)	48,30	26,50	22,30	36,50	46,90	42,70	19,70
Fator de Forma de Horton	0,43	0,44	0,51	0,17	0,18	0,17	0,37
Estrutura de drenagem	Dendrítica	Retangular	Retangular	Paralela	Dendrítica	Dendrítica	Retangular

Fonte: Elaborado com dados da CICH (2007a -2007b), ACP (2010) e da Universidade Federal de Pelotas (2011)

(1) Área com medição hidrométrica.

j) *Escoamento superficial*: é o volume de água que, como resultado da precipitação, flui pela superfície do solo e chega ao leito principal de uma bacia. Nas microbacias do Canal do Panamá são registrados valores diários, mensais e anuais de escoamento superficial expressos em pés cúbicos e metros cúbicos (Tabela 16). Mesmo que esta informação não seja utilizada diretamente no modelo de estimação de

impactos na produção de sedimentos, a disponibilidade de dados diários sobre escoamento superficial permite conhecer a quantidade e magnitude das enchentes ocorridas durante um determinado ano e, portanto, ter uma idéia da intensidade das chuvas. Alternativamente, a partir destes dados e da concentração de sedimentos, é possível estimar o impacto da cobertura florestal na produção de sedimentos;

Tabela 16 - Registros do escoamento superficial total anual em milhões de metros cúbicos (MM³) para as sete microbacias analisadas, de 1999 a 2009

Ano	Microbacia							Total
	Chagres	Pequení	Boquerón	Gatún	Trinidad	Cirí Grande	Caño Quebrado	
1999	1.362,00	583,00	327,00	321,00	276,00	409,00	155,79	3.433,79
2000	1.156,00	461,00	257,00	227,00	209,00	287,00	66,55	2.663,55
2001	783,00	383,00	204,00	156,00	145,00	244,00	64,06	1.979,06
2002	935,00	463,00	229,00	160,00	234,00	352,00	91,29	2.464,29
2003	847,00	377,00	201,00	200,00	285,00	371,00	74,60	2.355,60
2004	1.188,00	479,00	307,00	220,00	199,00	252,00	69,40	2.714,40
2005	839,00	344,00	198,00	143,00	179,00	234,00	61,00	1.998,00
2006	1.240,00	457,00	243,00	201,00	260,00	356,00	75,00	2.832,00
2007	1.269,00	531,00	276,00	243,00	269,00	382,00	118,00	3.088,00
2008	992,00	379,00	202,00	176,00	193,00	271,00	61,00	2.274,00
2009	1.219,00	503,00	309,00	215,00	201,00	244,00	63,30	2.754,30

Fonte: ACP (Anuarios Hidrológicos 2000 – 2010).

k) *Vazão média*: expressa o volume de água que passa em uma determinada seção de um rio, por unidade de tempo, e define a quantidade de água que aportam das microbacias aos reservatórios, sendo normalmente medida em metros cúbicos por segundo (m³.s⁻¹). Como nas microbacias analisadas a vazão é medida diariamente, pode ser calculada também a vazão média mensal e anual, ou também a vazão média para um período de anos (Tabela 17);

Tabela 17 - Registros da vazão media anual em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, para as sete microbacias, de 1999 a 2009

Ano	Microbacia							Total
	Chagres	Pequení	Boquerón	Gatún	Trinidad	Cirí Grande	Caño Quebrado	
1999	43,00	18,10	10,30	10,10	8,72	12,90	3,95	107,07
2000	36,40	14,30	8,12	7,15	6,60	9,09	2,03	83,69
2001	24,70	11,90	6,44	4,91	4,58	7,71	1,91	62,15
2002	29,50	14,40	7,24	5,07	7,40	11,10	2,33	77,04
2003	26,70	11,90	6,32	6,30	8,98	11,70	2,35	74,25
2004	37,60	15,10	9,70	6,97	6,27	7,96	2,19	85,79
2005	26,60	10,90	6,27	4,54	5,66	7,39	1,94	63,30
2006	39,20	14,40	7,68	6,35	8,22	11,30	2,36	89,51
2007	40,10	16,80	8,72	7,67	8,47	12,00	3,71	97,47
2008	31,30	12,00	6,35	5,57	6,08	8,55	1,93	71,78
2009	38,70	16,00	9,83	6,81	6,35	7,72	2,00	87,41

Fonte: ACP (Anuarios Hidrológicos 2000 – 2010).

l) *Custo de dragagem*: é o custo de retirar do fundo do Canal e reservatórios, os sedimentos acumulados. O custo de dragagem está composto basicamente por custos de equipamentos, mão-de-obra, combustíveis e outros apoios (ver Anexo A). De acordo com estudos realizados pela ACP, os custos de dragagem variam com o volume de material que precise ser extraído do leito do Canal e lagos (Tabela 18), ou seja, o custo de dragagem diminui se aumenta o volume de material que requer ser dragado (decrecentes a escala).

Os dados de custos de dragagem da Tabela 18 são estimativas feitas nos anos 2000 e 2003. Os valores foram atualizados para o ano de 2010 usando um Índice de Preços para o setor industrial que é anualmente calculado pelo Instituto Nacional de Estatística e Censo da CGR. A média do custo de dragagem no Canal do Panamá foi estimada em USD 13,78 por metro cúbico, que é o valor utilizado nas operações de cálculo do custo evitado pelas florestas do Canal do Panamá.

Tabela 18 – Estimativas do custo dragagem por metro cúbico de material. Atualizados ao ano 2010 usando o Índice de Preço industrial e de importação

Estudo	Data	Volume de material (m³)	Custo total (USD)	Custo unitario (USD/m³)	Custo unitario atualizado a 2010 (USD/m³) (1)
Estudio de Factibilidad del Proyecto de Profundización de Lago Gatún y corte Gaillard a 34' (10.4m)PLD	Dezembro, 2000	33.716.525	349.388.055	10,36	12,74
Technical analysis of Gaillard cut widening - 1 way Post-Panamax traffic	Julho, 2003a	20.966.050	230.626.555	11,00	13,64
Technical analysis to deepen Gatun Lake and Gaillard Cut to design channel bottom of 27.5' PLD	Julho, 2003b	26.539.137	320.132.817	12,06	14,96
Média					13,78

Fonte: ACP (2000, 2003a e 2003b)

⁽¹⁾ Ajustado com o índice de preços industrial.

6 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da análise estatística dos dados, enfatizando a estimativa do impacto físico e econômico da cobertura florestal na redução de sedimentos na bacia do Canal do Panamá. Embora a análise tenha sido feita com ênfase no conjunto das sete microbacias, comentam-se também os resultados obtidos quando estas são analisadas em subgrupos de acordo a sua localização na bacia do Canal. Com isso procurou-se obter resultados adicionais que apoiem as decisões de política de conservação das florestas da região estudada. Além disso, são discutidos os impactos para toda a bacia do Canal, generalizando os resultados para as sete microbacias avaliadas.

6.1 Impacto da cobertura florestal e de outras variáveis sobre a produção de sedimentos na bacia do Canal do Panamá

No período 1999-2009, a média anual ponderada de produção de sedimentos nas sete microbacias avaliadas atingiu $3,45 \text{ t.ha}^{-1}$ (345 t.km^{-2}) que foram depositados nos lagos Gatún e Alhajuela. As sete microbacias, que ocupam uma superfície de 118.400 hectares, produziram no total 408.445 toneladas anuais de sedimentos. Aplicando essa média para toda a bacia do Canal do Panamá, — de 296.642 ha, excluindo a superfície ocupada pela água — o total anual de sedimentos produzidos na bacia alcançaria a quantidade de 1.023.415 toneladas.

Ao longo do período estudado, ocorre uma redução, mais ou menos constante, da percentagem de cobertura florestal para essas microbacias. Ela passa de 67,18% em 1999 para 59,86% em 2009. A produção de sedimento, por outro lado, apresentou uma trajetória bastante irregular (crescente e decrescente) ao longo do mesmo período, sendo essa variação mais pronunciada nos últimos quatro anos (Figura 27).

Como indicado na literatura, essa grande variabilidade na taxa média anual de produção de sedimentos está associada ao fato de que a erosão e a produção de sedimentos, além da cobertura florestal, dependem de outras variáveis e características das microbacias, como por exemplo, da precipitação.

Figura 27 – Variação da cobertura florestal e produção de sedimentos durante o período 1999-2009, usando valores médios anuais do conjunto de microbacias

Fonte: Elaborado com dados da ACP (2000 - 2010) e da Universidade Federal de Pelotas (2011).

As chuvas são geralmente abundantes na bacia do Canal do Panamá e impactam significativamente a produção de sedimentos. Maiores níveis de produção de sedimentos parecem guardar relação com maiores precipitações como pode ser observado na Figura 28. Mas, maiores chuvas não estão sempre associadas a maiores taxas de sedimentação, como aconteceu no ano 1999. Apesar de ter sido muito chuvoso este ano não apresentou os maiores níveis de produção de sedimentos. Isso se deve ao fato que o impacto da chuva sobre a produção de sedimentos depende também da sua intensidade e concentração.

Figura 28 - Comportamento precipitação e produção de sedimentos durante o período 1999-2009, usando valores médios anuais do conjunto de microbacias

Fonte: Elaborado com dados da ACP (2000-2010).

Chuvas intensas e concentradas em períodos curtos provocam enchentes e transbordamento dos rios e córregos, aumentando a erosão do solo e a produção de sedimentos. Isso aconteceu em 2007, quando 27,75 % das chuvas ocorreram em apenas 10 dias, enquanto que em 1999, a concentração máxima das chuvas foi de 26,08 % para o mesmo período de tempo.

Para medir o impacto dessas diversas variáveis sobre a produção de sedimentos nas sete bacias hidrográficas, foi desenhado o seguinte modelo de regressão linear:

$$\text{sedimkm2} = \beta_0 + \beta_1 \text{cflorestal} + \beta_2 \text{areakm2} + \beta_3 \text{comptokm} + \beta_4 \text{declivgd} + \beta_5 \text{ddrenagem} + \beta_6 \text{estdren} + \beta_7 \text{ffhorton} + \beta_8 \text{precipdma} + \beta_9 \text{fip10dm} + \varepsilon$$

Em que:

i) *sedimkm2*: é a variável dependente e representa a produção anual de sedimentos expressa em t.km⁻².ano⁻¹;

ii) *cflorestal*: cobertura florestal expressa como porcentagem da área total da microbacia. A cobertura florestal amortece o impacto das chuvas, favorecendo a

infiltração, reduzindo o escoamento superficial e a produção de sedimentos. Espera-se que o sinal do parâmetro associado com essa variável (β_1) seja negativo, pois maior porcentagem de floresta deverá resultar em menor produção de sedimentos;

iii) *areakm2*: área da microbacia em quilômetros quadrados. Quanto maior a área de drenagem, maior é o volume de água captada das chuvas. Mas, nas bacias grandes, o tempo de escoamento da água é maior, e parte dos sedimentos ficam depositados ao longo do trecho percorrido. Existe uma relação inversa entre o tamanho da bacia e a taxa de sedimentação, o que significa que o sinal de β_2 deverá ser negativo;

iv) *comptokm*: comprimento do rio medido ao longo do leito principal, em quilômetros. Maior comprimento implica em maior tempo de transporte de água do divisor de águas até a saída da bacia, reduzindo a possibilidade de enchentes e de produção de sedimentos. Assim, espera-se que o sinal de β_3 seja negativo;

v) *declivgd*: declividade ou inclinação média do relevo da microbacia, em graus. Quanto maior a declividade do terreno, maior a velocidade e força que as águas do escoamento superficial alcançam, gerando também maior produção de sedimentos. Portanto, o sinal de β_4 deverá ser positivo;

vi) *ddrenagem*: número de leitos que existem em um sistema de drenagem expresso em km.km^{-2} . É um indicador importante da influência da geologia, topografia, solo e vegetação da bacia hidrográfica. Quanto maior o número de cursos de água numa bacia em relação a sua área, maior a probabilidade de picos de enchentes. Maior erosão geralmente está ligada a valores altos de densidade de drenagem, portanto, o sinal de β_5 deverá ser positivo;

vii) *estdren*: para a estrutura de drenagem, assumem-se os seguintes valores: (1) dendrítica, (2) retangular e (3) paralela. O sinal de β_6 deverá ser negativo já que estruturas de drenagem dendríticas apresentam maior densidade de drenagem e, portanto, maior erosão e sedimentação;

viii) *ffhorton*: fator de forma de cada microbacia, expresso pelo índice de Horton. Este índice relaciona a área de uma bacia com o comprimento do seu leito principal. Bacias de forma arredondada tendem a apresentar menor erosão e sedimentação, por isso o sinal de β_7 deverá ser negativo;

ix) *precipdma*: precipitação anual expressa em decímetros. É a variável de maior impacto na produção de sedimento, através do seu efeito na desagregação do solo e transporte das partículas. Maior precipitação implica maior produção de sedimentos, portanto o sinal de β_8 deverá ser positivo; e,

x) *fip10dm*: indicador que representa a intensidade das chuvas. Corresponde à somatória das precipitações dos dez dias mais chuvosos de cada ano. Chuvas concentradas em poucos dias geram altos níveis de escoamento superficial, provocando enchentes nos córregos e rios e, portanto, maior produção de sedimentos. O sinal de β_9 deverá ser positivo.

Parte das variáveis que influem no processo de erosão e sedimentação são características naturais das bacias, cujos valores são constantes no tempo e apenas variam de uma bacia para outra. Dados com essas características apresentam problemas de colinearidade, que distorcem a precisão dos estimadores do modelo de regressão, o que foi confirmado pelo teste do fator de inflação da variância (VIF). Como algumas soluções recomendadas pela teoria (aumentar o número de observações ou eliminar variáveis) não eram possíveis neste caso, os dados foram estruturados em painel para reduzir esse problema.

Pela razão anterior e por serem as microbacias do Canal territórios pequenos e contínuos, os dados apresentam também problemas de heterocedastia e correlação contemporânea, principalmente os dados de precipitação. Neste caso os problemas foram corrigidos aplicando *Panel Corrected Standard Errors* – PCSE do aplicativo Stata. No ANEXO C, são apresentados os resultados dos testes de detecção de colinearidade e heterocedastia.

Tomando em conta essas considerações, o modelo de regressão linear foi rodado aplicando Mínimos Quadrados Generalizados para painéis de dados correlacionados, gerando os resultados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultado da regressão aplicada ao painel de dados das sete microbacias

sedimkm2	Panel-corrected				
	Coef.	Std. Err.	Z	P> Z	[95% Conf. Interval]
cflorestal	-14,76294	3,46157	-4,26	0,000	-21,5475 -7,97839
areakm2	-2,473795	0,75671	-3,27	0,001	-3,95693 -0,99067
comptokm	-24,56933	13,9239	-1,76	0,078	-51,8597 2,72105
declivgd	109,7005	33,9890	3,23	0,001	43,0833 176,318
ddrenagem	1.852,521	508,522	3,64	0,000	855,837 2.849,21
estdren	-1.234,835	322,501	-3,83	0,000	-1.866,93 -602,745
ffhorton	-1.877,669	864,702	-2,17	0,030	-3.572,45 -182,884
precipdma	24,76777	9,17836	2,70	0,007	6,77853 42,7570
fip10dm	63,91356	31,9788	2,00	0,046	1,23631 126,591
_cons	-821,3371	310,361	-2,65	0,008	-1.429,63 -213,041

Linear regression, correlated panels corrected standard errors (PCSEs)

Group variable:	i	Number of obs	=	77	
Time variable:	t	Number of groups	=	7	
Panels:	correlated (balanced)	Obs per group: min	=	11	
Autocorrelation:	no autocorrelation	avg	=	11	
		max	=	11	
Estimated covariances	=	28	R-squared	=	0.6396
Estimated autocorrelations	=	0	wald chi2(9)	=	172.97
Estimated coefficients	=	10	Prob > chi2	=	0.0000

Nos resultados da regressão, $P>|Z| = 0$ indica que os coeficientes respectivos são estatisticamente significativos, com 95 % de confiança. Enquanto que, o coeficiente de determinação $R^2 = 0,6396$, indica que 63,96% da variação da produção de sedimentos é representada pela variação dos regressores do modelo. O coeficiente associado à cobertura florestal (β_1) apresenta sinal negativo (-14,76294) tal como era esperado, significando que aumentos na porcentagem de cobertura florestal reduzem a produção de sedimentos. Concretamente, cada um por cento (1%) de aumento na cobertura florestal na área estudada resultaria em uma redução de 14,76294 t.km⁻². ano⁻¹ de sedimentos, que é obtido derivando a equação do modelo com relação à cobertura florestal.

$$\begin{aligned} \text{sedimkm2} = & - 821,337 - 14,76294 \text{ cflorestal} - 2,473795 \text{ areakm2} - 24,56933 \text{ comptokm} \\ & + 109,7005 \text{ declivgd} + 1852,522 \text{ ddrenagem} - 1234,835 \text{ estdren} - 1877,669 \\ & \text{ffhorton} + 24,76778 \text{ precipdma} + 63,91354 \text{ fip10dm} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \text{sedimkm2}}{\partial \text{cflorestal}} = - 14,76 \text{ t.km}^2$$

Este resultado equivale dizer que um hectare de floresta contribui com uma redução de aproximadamente 14,76 toneladas de sedimentos por ano, pois um hectare corresponde a 1% de um quilômetro quadrado.

Figura 29 - Estimativa de sedimentos evitados pela cobertura florestal nas sete microbacias estudadas. Período 1999-2009

Fonte: Elaborada com base no resultado da regressão.

No ano 2010, a cobertura florestal das sete microbacias representava 59,86% da sua superfície total, ou seja, 70.874 ha. De acordo com o resultado encontrado, essas florestas reduzem $1.046.309 \text{ t.ano}^{-1}$ de sedimentos. Se generalizarmos esses resultados para toda a bacia do Canal do Panamá, com uma cobertura florestal

estimada em 200.811 ha (67,7%), a redução de sedimentos atribuível à floresta seria de 2.964.561 t.ano⁻¹.

Uma forma mais compreensível de interpretar o resultado do modelo é dizer que por cada hectare desflorestado são produzidos 14,76 t de sedimentos adicionais. No período 1999-2009, foram desflorestados 8.673,25 ha dentro das sete microbacias avaliadas, ou seja, uma média de 788,48 ha.ano⁻¹. A partir desses dados estimaram-se as quantidades anuais de sedimentos associadas à perda de cobertura florestal por desflorestamento (Figura 30). Assim, a produção de sedimentos associada ao desflorestamento atingiu uma taxa média 11.640 t.ano⁻¹, representando 2,85% da produção total de sedimentos dessa área (408.439,84 t.ano⁻¹). Em 2002, houve uma recuperação da cobertura florestal, indicada por valores negativos na taxa de desflorestamento. Mas, a taxa de redução de sedimentos por recuperação da cobertura florestal não é conhecida para a bacia do Canal.

Figura 30 - Estimativas da produção anual de sedimentos associada à perda de cobertura florestal nas sete microbacias estudadas. Período 1999-2009

Fonte: Elaborada com base no resultado da regressão.

6.2 Valor econômico do serviço ambiental por redução de sedimentos

Para uma densidade de $1,113 \text{ t.m}^{-3}$, a quantidade de sedimentos reduzida por cada hectare de floresta (14,76 t) equivale à $13,26 \text{ m}^3$. Mas, assumindo um ajuste de 8% por transporte de sedimentos de fundo¹³, essa quantidade aumentaria para $14,32 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Desta maneira, se o custo de dragagem de cada metro cúbico de sedimentos é USD 13,78, o custo evitado de dragagem associado a cada hectare de floresta é de USD 197,40 por ano ($14,3252 \times 13,78$). Portanto, para as 70.874 ha de floresta contidas nas sete microbacias o custo evitado de dragagem correspondente seria de USD 13.990.528 por ano, ou seja:

$$Ced = (14,3252 \times 13,78) \times 70.874 = \text{USD } 13.990.528$$

Generalizando essa estimativa para toda a floresta da bacia do Canal, o custo evitado de dragagem correspondente seria de USD 39.640.091 por ano (Figura 31):

$$Ced = (14,3252 \times 13,78) \times 200.811 = \text{USD } 39.640.091$$

Figura 31 – Ilustração gráfica do custo evitado (poupança) associado ao serviço ambiental de redução da produção de sedimentos da floresta da bacia do Canal do Panamá para cenários de cobertura florestal atual

Fonte: Elaborada com base no resultado da regressão.

¹³ Segundo o “Informe del Programa de Sedimentos Suspendidos del Período 1998 – 2007” de ACP os sedimentos de fundos se estimam entre 2 e 15 % do total na bacia do Canal do Panamá.

Separando as microbacias em dois subgrupos: aquelas que descarregam no lago Gatún (Trinidad, Cirí Grande, Caño Quebrado e Gatún) e aquelas que descarregam no lago Alhajuela (Chagres, Pequení e Boquerón), é possível identificar que a cobertura florestal apresenta efeitos diferentes, dependendo da localização da microbacia. No primeiro grupo, o efeito da cobertura florestal sobre a redução de sedimentos é de apenas $9,80 \text{ t.ha}^{-1}$, enquanto que no segundo grupo, o efeito é bastante maior, atingindo $21,38 \text{ t.ha}^{-1}$. Embora os dados não permitam estimar de forma confiável o impacto da floresta para grupos pequenos ou para microbacias individuais, uma aproximação foi feita a partir de diferenças nos coeficientes de regressões aplicadas a subgrupos de cinco e seis microbacias. Esses resultados encontram-se apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Estimativas de impactos da cobertura florestal na redução da produção de sedimentos para cada uma das microbacias estudadas

Microbacia	Impacto da coberta florestal na redução de sedimentos		Valor USD.ha ⁻¹ .ano ⁻¹
	t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹	m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹ (1)	
Chagres	28,59610	27,7482	382,37
Pequení	19,75321	19,1675	264,13
Boquerón	15,79336	15,3251	211,18
Gatún	11,57603	11,2328	154,79
Trinidad	6,70610	6,5073	89,67
Cirí Grande	14,13930	13,7201	189,06
Caño Quebrado	6,77649	6,5756	90,61
Média	14,76294	14,3252	197,40

(1) Valores ajustado com 8% adicional por sedimentos de fundo.

Uma estimativa do valor presente do custo evitado pelas florestas de toda a bacia do Canal para o período 1999-2009 foi feita aplicando a equação (2). O resultado é que, durante esse período, as florestas evitaram custos de dragagem pelo valor de USD 572.499.580 aproximadamente:

$$VP = \sum_{t=0}^{10} Ced_t * (1,08)^{10-t} = \text{USD } 572.499.580$$

Adicionalmente á estimação do impacto da cobertura florestal sobre a produção de sedimentos, foram realizados outras análises complementares, usando o mesmo modelo de regressão linear com apenas pequenas mudanças de substituição de variáveis. A continuação se indicam essas análises e as modificações aos modelos que foram rodados, enquanto que os resultados são apresentados nos ANEXOS D e E:

a) Impacto do uso agrícola sobre a produção de sedimentos

$$sedimkm2 = \beta_0 + \beta_1 agricola + \beta_2 areakm2 + \beta_3 comptokm + \beta_4 declivgd + \beta_5 ddrenagem + \beta_6 estdren + \beta_7 fffhorton + \beta_8 precipdma + \beta_9 fip10dm + \varepsilon$$

Em que:

agricola: porcentagem de solos de uso agrícola em cada microbacia

b) Impacto do uso pecuário (pastagem) sobre a produção de sedimentos

$$sedimkm2 = \beta_0 + \beta_1 pastagem + \beta_2 areakm2 + \beta_3 comptokm + \beta_4 declivgd + \beta_5 ddrenagem + \beta_6 estdren + \beta_7 fffhorton + \beta_8 precipdma + \beta_9 fip10dm + \varepsilon$$

Em que:

pastagem: porcentagem de solos de uso pecuário em cada microbacia

c) Impacto de outros usos do solo sobre a produção de sedimentos

$$sedimkm2 = \beta_0 + \beta_1 ousos + \beta_2 areakm2 + \beta_3 comptokm + \beta_4 declivgd + \beta_5 ddrenagem + \beta_6 estdren + \beta_7 fffhorton + \beta_8 precipdma + \beta_9 fip10dm + \varepsilon$$

Em que:

ousos: porcentagem de solos dedicados a outros usos em cada microbacia

d) Impacto da cobertura florestal sobre a produção de escoamento superficial

$$escsupmckm2 = \beta_0 + \beta_1 cflorestal + \beta_2 areakm2 + \beta_3 comptokm + \beta_4 declivgd + \beta_5 ddrenagem + \beta_6 estdren + \beta_7 fffhorton + \beta_8 precipdma + \beta_9 fip10dm + \varepsilon$$

Em que:

escsupmckm2: escoamento superficial em metros cúbicos por quilômetro quadrado

e) Impacto do uso agrícola sobre a produção de escoamento superficial

$$escsupmckm2 = \beta_0 + \beta_1 agricola + \beta_2 areakm2 + \beta_3 comptokm + \beta_4 declivgd + \beta_5 ddrenagem + \beta_6 estdren + \beta_7 fffhorton + \beta_8 precipdma + \beta_9 fip10dm + \varepsilon$$

Em que:

escsupmckm2: escoamento superficial em metros cúbicos por quilômetro quadrado

agricola: porcentagem de solos de uso agrícola em cada microbacia

f) Impacto do uso pecuário (pastagem) sobre a produção de escoamento superficial

$$escsupmckm2 = \beta_0 + \beta_1 pastagem + \beta_2 areakm2 + \beta_3 comptokm + \beta_4 declivgd + \beta_5 ddrenagem + \beta_6 estdren + \beta_7 fffhorton + \beta_8 precipdma + \beta_9 fip10dm + \varepsilon$$

Em que:

escsupmckm2: escoamento superficial em metros cúbicos por quilômetro quadrado

pastagem: porcentagem de solos de uso pecuário em cada microbacia

E importante aclarar que, aumento em um determinado uso do solo implicaria diminuição nos outros usos, ou seja, as variações nos usos do solo dependem entre se. Portanto, incluir simultaneamente mais de um uso do solo no modelo de regressão gera colinearidade perfeita e estimadores distorcidos.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados, a cobertura florestal gera reduções na produção de sedimentos na bacia do Canal do Panamá, contribuindo positiva e significativamente para mitigar o processo de assoreamento dos lagos de armazenamento de água para o funcionamento do Canal. Incluindo sedimentos de fundo, cada hectare de floresta reduz cerca $14,33 \text{ m}^3$ de sedimentos anuais, que equivalem a um custo evitado de dragagem de USD 197,40. Dessa forma, a contribuição de toda a floresta da bacia do Canal na redução de sedimentos pode ser valorada em USD 39.640.091 por ano.

Ao mesmo tempo, ocorre um processo de desflorestamento que, nas sete microbacias estudadas atingiu uma média de $788,48 \text{ ha.ano}^{-1}$ para o período 1999-2009. Isso significa que o processo de desflorestamento contribui no aumento da produção média anual de sedimentos dessa área em 2,85%. Aplicando essa mesma taxa de desflorestamento para toda a bacia do Canal, a perda anual de cobertura florestal foi estimado em 1.475,30 hectares nesse mesmo período, implicando aumentos na produção de sedimentos de $21.134 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ e custos de dragagem que podem ser valorados em USD 291.224 por ano. Se considerarmos que, apenas 43,02% dos sedimentos produzidos são efetivamente dragados, esse valor se reduziria para USD 125.285 por ano.

Esse impacto das florestas na redução de sedimentos é maior nas microbacias que deságuam no lago Alhajuela, e estaria associado as maiores declividades do relevo e precipitações dessa área, segundo os argumentos teóricos já discutidos. De acordo com os resultados, aumentos de 100 mm na precipitação geram aumentos de $24,77 \text{ t.km}^{-2}$ de sedimentos e aumentos de 100 mm na concentração da chuva geram aumentos de $63,91 \text{ t.km}^{-2}$ de sedimentos.

Os dados de usos do solo não permitem conhecer que parcela da floresta é transformada em uso agrícola ou pecuário logo do desflorestamento, porque também usos agrícolas passam a pastagens e vice-versa. Mas, a análise dos dados de usos do solo nas sete microbacias estudadas, confirma que atividades agropecuárias são estabelecidas posteriormente ao desflorestamento. Os dados indicam que o uso de solo agrícola cresceu de 14,76% para 16,35% e as pastagens aumentaram de 17% para

21,12% durante o período 1999-2010. Esse incremento é quase igual à redução da cobertura florestal, que passou de 66,99% a 60,77% nesse mesmo período. Substituindo no modelo de regressão linear a variável cobertura florestal por uso agrícola e pastagem, os resultados indicam que, aumentos de 1% nestes usos do solo, aumentam a produção de sedimentos em 32,26 t.km⁻² e 11,32 t.km⁻², respectivamente.

Em termos de proporção¹⁴, a produção de sedimentos em solos agrícolas e pastagens com relação às florestas na bacia do Canal é maior si comparada com os resultados achados por Barbosa e Fearnside (2000) na região de Apiaú no Estado de Roraima entre 1988 e 1992, e que os achados por Neil e Galloway, 1989 apud Mahmoudzadeh (2002), no Estado de New South Wales na Austrália em 1989. Mas, são bastante menores que os resultados achados para Senegal e Costa de Marfim, listados por Stadtmuller (1994);

A partir das anteriores relações, foi feita uma estimativa do aporte de cada classe de uso do solo na produção atual de sedimentos na bacia do Canal. Assim, estima-se que aproximadamente 91,97% dos sedimentos na bacia do Canal estão sendo aportados por usos de solos agrícolas e pecuários, enquanto que apenas 4,74% por usos florestais (Tabela 21). Esses resultados são estimativas baseadas nos valores médios de produção de sedimentos e usos do solo para as sete microbacias, portanto, para cada microbacia em particular serão diferentes, conforme suas próprias características e variáveis, que afetam o processo de sedimentação.

¹⁴ (sedimentos produzidos em solos agrícolas/sedimentos produzidos em solos de uso florestal)*100

Tabela 21 - Estimativas do aporte atual das classes de uso do solo à produção média anual de sedimentos nas sete microbacias analisadas, para o período 1999-2009

Uso do solo	Produção de sedimentos		
	t.km ⁻²	t.ha ⁻¹	%
Florestal	16,35	0,16	4,74
Agricultura	187,53	1,88	54,36
Pastagem	129,74	1,30	37,61
Outros usos	11,35	0,11	3,29
Total	344,97	3,45	100,00

Nota: Esta estimativa de aporte de sedimentos é para uma unidade de área com 60,77% de cobertura florestal, 16,35% de uso agrícola, 21,12% pastagem e 1,76% de outros usos.

As florestas constituem uma grande parcela das áreas protegidas da bacia do Canal do Panamá e geram diversos serviços para a sociedade como colheita de produtos não florestais, possibilidade de realizar certas atividades recreativas, turismo, uso de características genéticas e bioquímicas de espécies para desenvolvimento de novos produtos agrícolas, farmacêutico ou biotecnológicos. A essa gama de bens e serviços estão associados os valores de uso direto, uso indireto e de não uso, que no seu conjunto constituem o Valor Econômico Total da floresta. Estimções feitas pela Autoridade Nacional do Ambiente (ANAM) no período 2003-2005 para as três principais áreas protegidas da bacia do Canal, onde predominam as florestas, indicam um valor econômico total próximo à USD 773,03 por hectare (Tabela 22). Assim, adicionando este novo valor ao conjunto, temos que o VET das florestas da bacia do Canal pode atingir até USD 970,43 por hectare.

Tabela 22 – Média do Valor Econômico Total - VET estimado para os parques nacionais Chagres, Soberania e Campana na bacia do Canal do Panamá em USD por hectare

Tipo de valor	Valor (USD/ha)
VALOR DE USO DIRETO	55,08
DAP Realização de atividades	20,21
Materiais de construção	8,45
Colheita de produtos não florestais	25,69
Renda Turistas Nacionais	0,27
Renda Turistas Estrangeiros	0,17
Rendas licenças de pesquisa científicas	0,01
Outras rendas	0,27
VALOR DE USO INDIRETO	669,09
Função Regulação climática	1,31
Proteção de Solos	26,74
Valor Cultural	0,03
Armazenamento de CO ₂	641,01
VALOR DE NÃO USO	48,86
DAP Conservação (visitante local)	18,92
DAP Conservação (visitante estrangeiro)	6,29
DAP Existência	0,32
Valor Opção Bioprospecção	1,03
DAP Opção Farmacêutica	22,29
TOTAL	773,03

Fonte: Baseado em dados da Autoridade Nacional do Ambiente – ANAM (2006).

No caso do Canal, a análise estatística dos dados a través regressão linear usando MQG, gera resultados não significativos ($P > |Z| = 0,970$) sobre o impacto da cobertura florestal no escoamento superficial. Mas, os resultados da análise indicam que aumentos de 1% no uso agrícola aumentam o escoamento superficial em 51.216 m³.km⁻². Enquanto que, aumentos de 1% nos usos pecuários (pastagem) aumentam o escoamento superficial em 10.770 m³.km⁻². Portanto, o impacto da cobertura florestal no escoamento superficial deveria ser menor que nos outros usos do solo de acordo conforme descrito nos fundamentos teóricos do presente trabalho.

Finalmente, para as variáveis que representam o impacto das características naturais das microbacias (área, comprimento do leito, declividade, densidade de

drenagem, estrutura de drenagem e forma) sobre a produção de sedimentos e escoamento superficial, os resultados da análise estatística são menos confiáveis e mais difíceis de entender. Os valores dessas variáveis são constantes e podem não refletir adequadamente seu impacto no modelo devido ao fato que geram problemas de heterocedastia e coliniaridade, embora esses problemas tenham sido mitigados com o uso de dados em painel e aplicação de Mínimos Quadrados Generalizados.

8 CONCLUSÕES

A partir dos resultados o presente trabalho permite fazer as seguintes conclusões:

O valor econômico estimado para as florestas da bacia do Canal pelo serviço ambiental de redução de sedimentos, serve como referencia para o estabelecimento e aplicação de políticas e programas de conservação de florestal. Em geral, investimentos ou incentivos abaixo de USD 197,40 por hectare por ano para conservar ou recuperar cobertura florestal representariam políticas rentáveis financeiramente com o fim específico de reduzir sedimentos. Investimentos ou incentivos de conservação acima de USD 197,40 por ano por hectare podem, no entanto, ser viáveis, se o objetivo de redução de sedimentos for combinado com a produção de outros bens e serviços de interesse da floresta, cujo valor econômico possa ser capturado pelo investidor.

Também poderia haver interesse por políticas de incentivos de conservação florestal diferenciadas para microbacias específicas ou grupos de microbacias. Neste caso, para as microbacias que descarregam no lago Alhajuela, os investimentos ou incentivos para conservar ou recuperar cobertura florestal poderiam ser de até USD 285,90 por hectare por ano. Analogamente, para conservar ou recuperar cobertura florestal, os incentivos seriam menores nas microbacias que descarregam no lago Gatún, de aproximadamente USD 131,03 por hectare por ano. Considerando apenas os sedimentos efetivamente dragados pela ACP, estes valores se reduziriam para USD 123,00 e 56,37 por hectare por ano, respectivamente.

Adicionalmente, medidas de natureza técnica podem ser consideradas na redução de sedimentos. Os dados analisados indicam que maiores taxas de produção de sedimentos nas microbacias estão associado a maior declividade, precipitação e com usos de solos para culturas. Portanto, nos esforços dirigidos a reduzir o assoreamento e perda de capacidade dos lagos do Canal, deveriam ser incluídas medidas de conservação que levem em conta a escolha de culturas de acordo a estacionalidade das chuvas. Além das práticas de recuperação florestal e conservação de solos tradicionais, o uso de espécies agrícolas que forneçam uma melhor proteção

do solo nos meses mais chuvosos (outubro, novembro e dezembro) ajudaria a reduzir a geração de sedimentos, especialmente em áreas inclinadas.

A evolução da cobertura florestal mostra que, nas microbacias localizadas totalmente dentro de Parques Nacionais (Chagres, Pequení e Boquerón), as taxas de desflorestamento têm sido significativamente menores se comparadas com as localizadas fora delas. Isso confirma que políticas de proteção na forma de áreas de preservação foram positivas para reduzir a perda de cobertura florestal e a produção de sedimentos. Portanto, a ampliação desta política seria útil como medida para mitigar o problema do assoreamento dos lagos.

As florestas reduzem a produção de sedimentos, mas também produzem menos escoamento superficial em relação com outros usos do solo. Embora, esse último impacto não seria tão importante, pois com o grau de cobertura florestal atual a bacia do Canal gera água suficiente para encher os reservatórios e ainda em média 12% da água produzida anualmente precisa ser liberada por falta de capacidade de armazenamento (ACP, 2006). Visto desta forma, seria mais conveniente para o Canal manter ou aumentar a porcentagem de cobertura florestal da bacia, para reduzir a perda de capacidade de armazenamento dos lagos por assoreamento e prevenir a necessidade de ter que jogar fora uma quantidade maior de água no futuro.

Portanto, nas condições atuais de capacidade de armazenamento de água dos reservatórios do Canal, não haveria ganho econômico decorrente do aumento do escoamento superficial a partir da eliminação de cobertura florestal. Pelo contrário, essa medida teria efeitos importantes no aumento do assoreamento dos reservatórios e, consequentemente, dos custos de dragagem.

Como limitação o presente trabalho não utilizou informações sobre as características do solo. A quantidade desse tipo de informação na bacia do Canal do Panamá é muito limitada e não foi possível incluí-la no modelo de regressão. O fato da área geográfica da bacia do Canal ser relativamente pequena, pode suportar a hipótese (não testada) de que os seus solos são homogêneos do ponto de vista físico. Mas, de qualquer forma, seria interessante realizar pesquisas nessa direção de modo que essa informação esteja disponível para a análise do problema da sedimentação na bacia do Canal.

De igual forma, a informação sobre a proporção de sedimentos que compõem o volume de material dragado anualmente no Canal é muito limitada, não permitindo determinar com clareza que parcela dos sedimentos produzidos por erosão de solos na bacia do Canal são efetivamente dragados pela ACP. Portanto, para determinar com maior precisão o impacto da floresta na redução de custos de dragagem é necessário que essa informação seja aprimorada.

Um aspecto ainda mais complexo que mereceria atenção no futuro relaciona-se com o processo de erosão e sedimentação logo após a eliminação da floresta. O conhecimento dessa dinâmica, desde o desmatamento até a estabilização da taxa sedimentação, permitiria melhor análise intertemporal do efeito da floresta sobre a produção de sedimentos. Assim, estudos nesta direção são necessários para melhorar as estimações do valor econômico da floresta na redução da produção de sedimentos. Neste contexto, o resultado de que um hectare de floresta reduz $14,79294 \text{ t.ha}^{-1}$ de sedimentos por ano não deve levar a concluir que um hectare reflorestado ou recuperado reduzirá essa quantidade imediatamente.

REFERENCIAS

AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ – ACP. **Informe anual**. Panamá, 2001-2011. Disponível em: <<http://www.pancanal.com>>. Acesso em: 27 jul. 2009.

_____. **Anuario Hidrológico**. Panamá, 2000-2010. Disponível em: <<http://www.pancanal.com>>. Acesso em: 20 jul. 2009.

_____. **Estudio de Factibilidad del Proyecto de Profundización del lago Gatún e Corte Gaillard a 34' (10,4 metros) PLD**. Panamá, 2000. 98 p.

_____. **Plan Maestro del Canal de Panamá**. Panamá, 2006. 484 p.

_____. **Informe del programa de sedimentos suspendidos del periodo 1998-2007**. Panamá, 2010. 31 p.

_____. **Technical analysis of Gaillard cut widening - 1 way Post-Panamax traffic**. Panamá, 2003a. 233 p.

_____. **Technical analysis to deepen Gatún Lake and Gaillard Cut to design channel bottom of 27.5' PLD**. Panamá, 2003b. 193 p.

AUSTRALIAN GOVERNMENT DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND HERITAGE. **Making economic valuation work for biodiversity conservation**. Camberra: Land & Water Austrália, 2005. Disponível em: <<http://www.lwa.gov.au>>. Acesso em: 16 nov. 2009.

BARBOSA, R.I.; FEARNSIDE, P.M. Erosão do solo na Amazônia: estudo de caso na região do Apiaú, Roraima, Brasil. **Revista Acta Amazônica**, Manaus, Brasil, v.4, n.30 p. 601-613, 2000.

BEECHER, J.A. **Avoided Cost**: an essential concept for integrated resource planning. Indianapolis: Indiana University-Purdue University, Center for Urban Policy and the Environment. 35 p. 1996.

BISHOP, J.T.; LANDELL-MILLS, N. **Los servicios ambientales de los bosques:** información general. En: La venta de servicios ambientales forestales. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003. 459 p.

CALDER, I.R. **Forests and Hydrologic Services. Reconciling public and science perceptions.** United Kingdom: University of Newcastle upon Tyne, Centre for Land Use and Water Resource Research, 1999. p. 2-3.

CANCINO, J.; DONOSO, G. Proyecciones del Valor del Daño Evitado sobre la Producción Agrícola de la Cuenca del Río Mapocho al Controlar los Niveles de Ozono. **Ciencia e Investigación Agraria**, Santiago de Chile, v. 1, n. 28, p. 43-54, 2001.

CEPAL. **Guía para decisores. Análisis económico de externalidades ambientales.** Colección Documentos de proyectos. Santiago de Chile, 2008. 82p.

CHOMITZ, K.M.; KUMARI, K. **The domestic benefits of tropical forests:** a critical review. Washington: The World Bank, The Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, 1998. 31 p. (Working Paper GEC 96-19).

CONSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; FARBERK, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R.V.; PARUELO, J., RASKIN, R.G.; VAN DEN BELT, P.S.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Revista Nature**, London, v. 387, p. 253-260, 1997.

CORNEJO, M.; BERREZUETA, E. Metodologías de valoración de las actividades de uso del suelo en Zaruma-Portovelo. **Revista Tecnológica**, Ecuador, v. 17, n. 1, p. 133-151, 2003.

CRISTECHE, E.; PENNA, J.A. **Métodos de valoración económica de los servicios ambientales.** Argentina: INTA, 2008. 55 p. (Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales, 3).

CURTIS, I.A. Valuing ecosystem goods and services: a new approach using a surrogate market and the combination of a multiple criteria analysis and a Delphi panel to assign weights to the attributes. **Ecological Economics**, Amsterdam, n. 50, p.163–194. 2004. Disponível em: <<http://www.elsevier.com>>. Acesso em: 30 jun. 2010.

DE GROOT, R.S.; WILSON, M.A.; BOUMANS, R.M.J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 41, p. 393-408, 2002. Disponível em: <<http://www.elsevier.com>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

DE GROOT, R.S. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, n. 75, p. 175–186, 2006. Disponível em: <<http://www.elsevier.com>>. Acesso em: 18 abr. 2011.

DE PAULA LIMA, W. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2.ed. São Paulo: USP, 2008. 246 p.

ESPINOSA, D.; MENDEZ, A.; MADRID, I.; RIVERA, R. Assessmet of climate change impacts on the water resources of Panama: the case of the La Villa, Chiriquí and the Chagres river basins. **Climate Research**, University of Cambridge, v.9, p. 131-137, 1997. Disponível em: <<http://www.int-res.com>> Acesso em: 14 sep. 2009.

FAO. **La evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Hacia la ordenación forestal sostenible**. Roma, 2006. 346 p. (Estudio FAO Montes, 147). Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 23 de maio. 2010.

_____. **Relaciones tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales**. Actas del taller electrónico organizado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la FAO 18 de septiembre -27 de octubre de 2000. Roma, 2002. 88 p. (Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, Boletín de Tierras y Aguas, 9).

_____. **Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos**. Roma, 1997. 115 p. (FAO, Estudio Riego y Drenaje, 55).

_____. **Valuing forests: context, issues and guidelines.** Roma, 1995. 53 p. (FAO, Forestry Paper, 127).

_____. **Economics assessment of forestry project impacts.** Roma, 1992. 134 p. (FAO, Forestry Paper, 106).

FREEMAN, A. M. **The measurement of environmental and resource values: theory and methods.** 2 ed. Washington: RFF Press, 2003. 491 p.

FREEMAN, A.M. **The measure of environmental and resource values: theory and methods.** Washington: Resources for the Future, 1993. 516p.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ G. A. **Hidrologia.** 2 ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1988. 291 p.

GENTILI, J.; GIL, V.; CAMPO, A. **Factores generadores de erosión hídrica potencial y medidas de mitigación en el partido de Coronel Suárez.** Buenos Aires: Universidad Nacional del Sur, 2007. 15 p.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; DE GROOT, R. Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. **Ecosistemas**, Alicante, v. 16. n. 3, p. 4-14, 2007. Disponível em: <<http://www.revistaecosistemas.net>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

GRIFFITHS, P.G.; HEREFORD, R.; WEBB, R.H. Sediment yield and runoff frequency of small drainage basins in the Mojave Desert, California and Nevada. **U.S. Geological Survey**, Fact Sheet 2006-3007, 2006. 4 p. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov>>. Acesso em: 20 mar. 2011.

HARMON, R.S. **The río Chagres, Panamá. A multidisciplinary profile of a tropical watershed.** Netherlands: Published by Springer, 2005. 354 p.

HOWARTH, R.B.; FARBER, S. Accounting for the value of ecosystem services. **Ecological Economics**, Columbus, v. 41, p. 421-429, 2002. Disponível em: <<http://www.elsevier.com>>. Acesso em: 25 fev. 2010.

INTRACORP; ASESORES ESTRATEGICOS. **Estudio del impacto económico del Canal en el ámbito nacional. Período de pre-transferencia 1950-1999.** Panamá: ACP, 2006. v. 2, 364 p.

KENGEN, S. **Forest valuation for decision making:** lessons of experience and proposals for improvement. Roma: FAO, 1997. 165 p.

KRIEGER, D.J. **Economic value of forests ecosystem services:** a review. Washington: The Wilderness Society 2001. 30 p.

LOMAS, P.L.; MARTÍN-LÓPEZ, B.; LOUIT, C.; MONTOYA, D.; MONTES, C; ÁLVAREZ, S. **Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas.** Madrid: Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez, 2005. 77 p.

MAHMOUDZADEH, A.; ERSKINE, W.D.; BROWNING, C.M.; MYERS, C. Sediment yields and soil loss rates from native forest, pasture and cultivated land in the Bathurst area, New South Wales. **Australian Forestry**, Canberra, n. 65, p. 73 – 80, 2002.

McCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and design.** 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 814 p.

MENDIETA, J.C. **Manual de Valoración Económica de Bienes no Mercadeables. Aplicaciones de las Técnicas de Valoración de Bienes No Mercadeables, y el Análisis Costo Beneficio y el Medio Ambiente.** Bogotá: Universidad de Los Andes, 2001. 307 p. (Documento CEDE, 99 -10).

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Concepts of ecosystem value and valuation approaches. Ecosystems and human well-being.** A framework for assessment. Washington: Island Press, 2003. 236 p.

MONTAGNÉ, C.; HAROU, P.; GARCIA, S.; JACOB, J.; STENGER, A. **Référentiel pour l'évaluation économique des biens, services et dommages environnementaux liés à la forêt française.** Nancy: Laboratoire d'Economie Forestière, Agro Paris Tech, 2008. 161 p. (Rapport Final).

PANAMÁ: Autoridad Nacional del Ambiente. **Plan de manejo del Parque Nacional Chagres**. Panamá, 2005. 159 p. (Documento Técnico).

_____. **Valoración Económica de los Recursos Naturales y Diseño de un Sistema de Cuentas Ambientales Satélite en el Marco de las Cuentas Nacionales de Panamá**, Informe Final 2006. 4 v.

PANAMÁ. Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. **Informe del Estado Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá**. Panamá, 2007. 76 p. Disponible en: <<http://www.cich.org>>. Acceso en: 20 Ago. 2010.

_____. **Plan de acción inmediata para el desarrollo humano, apoyo a la producción y manejo ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá 2005-2010**. Panamá, 2004. 83 p. (Documento borrador).

_____. **Plan de acción inmediata para la subcuenca del río Pequení**. Panamá, 2007a. 22 p.

_____. **Plan de acción inmediata para la subcuenca del río Boquerón**. Panamá, 2007b. 30 p.

_____. **Plan de acción inmediata para la subcuenca del río Gatún**. Panamá, 2007c. 32 p.

_____. **Plan de acción inmediata para la subcuenca del río Trinidad**. Panamá, 2007d. 41 p.

_____. **Plan de acción inmediata para la subcuenca del río Cirí Grande**. Panamá, 2007e. 35 p.

_____. **Plan de acción inmediata para la subcuenca del río Caño Quebrado**. Panamá, 2007f. 34 p.

_____. **Plan de manejo para las subcuencas de los ríos Cirí Grande y Trinidad. Informe final**. Panamá, 2008. 164 p.

_____. **Programa de Vigilancia de la Cobertura Vegetal Región Oriental de la Cuenca del Canal. Informe de cobertura boscosa.** Panamá, 2006. 130 p. Disponible em: <<http://www.cich.org>>. Acesso em: 12 nov. 2009.

PANAMÁ. Contraloría General de la República. **Producto Interno Bruto a precios corrientes anual y a precios constantes anual y trimestral: año 2010.** Panamá, 2011a. Disponible em: <<http://www.contraloria.gob.pa.>> Acesso em: 5 maio. 2011.

_____. **Situación económica. Compendio histórico de las series estadísticas principales de las Cuentas Nacionales de Panamá** (versión solo para Internet). Panamá, 2011b. Disponible em: <<http://www.contraloria.gob.pa.>>. Acesso em: 5 maio. 2011.

PANAMA. Ministerio de Economía y Finanzas - MEF. **Informe Económico y Social – 2010.** Panamá, 2011. 76 p. Disponible em: <<http://www.mef.gob.pa.>>. Acesso em: 6 Maio. 2011.

_____. **Informe económico anual 2003.** Panamá, 2004. 108p.

PATTANAYAK, S.K. Valuing watershed services: concepts and empirics from Southeast Asia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, n.1, p. 171-184, 2004. Disponible em: <<http://www.elsevier.com>>. Acesso em: 20 Mar. 2011.

PEARCE, D.W. The economic value of forest ecosystems. **Ecosystem Health**, London, v. 7, n. 4, p. 284- 296, Dec. 2001.

SABONGE, R.; SÁNCHEZ, R. **El Canal de Panamá en la economía de América Latina y el Caribe.** Santiago de Chile: CEPAL, 2009. 71 p. (Colección documento de proyecto).

SÁNCHEZ, I.R.; LEDESMA, Z.M. Acercamiento a la medición de las externalidades en el enfoque económico social de evaluación de inversiones. **Revista Universidad Eafit**, Medellín, v. 39, n. 131, p. 32-40, 2003.

SCHWAB, G.O; FANGEIR, D.D.; ELLIOT, W.S.; FREVERT, R.K. **Soil and water conservation engineering**. 2 ed. New York: J.Wiley, 1966. 683 p.

SEID, A.; MORAES, A.S. Global valuation of ecosystem services: application to the Pantanal da Nhecolandia, Brazil. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 33, n. 1, p. 1-6, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevier.com>>. Acesso em: 11 Nov. 2009.

SENCIÓN, G. **Valoración económica de un ecosistema**: Bosque Tropical Petén. Guatemala: Universidad de la República, 2002. 31 p. (Documento Nº 15/02).

STADTMULLER, T. **Impacto Hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales**: medidas para mitigarlo. Una revisión bibliográfica. Costa Rica: CATIE, 1994. 62 p. (Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Naturales, 10).

THORNES, J.B. The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes. In _____. **Vegetation and erosion**: processes and environments. Chichester: John Wiley & Sons, 1990. p. 41-53.

UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT – USAID, AUTORIDAD NACIONAL DEL AMBIENTE – ANAM, SMITHSONIAN TROPICAL RESEARCH INSTITUTE – STRI. **La cuenca del Canal**: deforestación, urbanización y contaminación. Panamá, 1999. 120 p. (Sumario ejecutivo del Informe Final).

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. **Evaluación económica de impactos ambientales en proyectos sujetos a licenciamiento ambiental**. Manual técnico (Documento para discusión). Bogotá. No prelo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. Faculdade de Agronomia. Departamento de Engenharia Rural. Grupo de Análise e Monitoramento Agrícola – GAMA. **Mapeamento do uso do solo em microbacias no entorno do Canal do Panamá**. Pelotas, 2011. 15 p.

ANEXOS

ANEXO A - Custo de dragagem por metro cúbico da draga "Christensen" para uma distancia de carregamento de até 20 quilômetros. Para um volume semanal de 30.000 metros cúbicos de material

Descrição	Custos (2000)		Custos (2010) (1)	
	Totais	Marginais	Totais	Marginais
Custo de disponibilidade por hora	299	n.a	369	
Custo de mao-de-obra por hora	531	531	656	656
Custos indiretos aplicados a mao-de-obra	64	64	79	79
Custo mediodo combustível por hora	55	55	68	68
Apoio de rebocador grande	354	354	437	437
Apoio de rebocador medio	217	217	268	268
Apoio de rebocador pequeno	112	112	138	138
Apoio de barco de guarda o passageiros	74	74	91	91
Apoio de barco para sitios de espolio	87	87	107	107
Apoio de barcos para hidrografia	14	14	17	17
Sub-total de apoio	858	858	1.060	1.060
Total	1.807	1.508	2.232	1.863
Custo por Periodo				
Custo por disponibilidade de 8 horas	2.390	n.a	2.952	
Custo de mao-de-obra por 8 horas	4.758	4.758	5.878	5.878
Consumo de combustível por 6 horas	330	330	408	408
Apoio por 8 horas	6.860	6.860	8.474	8.474
Custo Total por Periodo	14.338	11.948	17.712	14.759
Custo por Día				
Custo de disponibilidade	7.170	n.a	8.857	
Custo de mao-de-obra	14.274	14.274	17.633	17.633
Consumo de combustível	990	990	1.223	1.223
Apoio	20.579	20.579	25.421	25.421
Custo Total por Día	43.013	35.843	53.134	44.277
Custo por Semana				
Custo de disponibilidade	50.190		61.999	
Custo de mao-de-obra	99.915	99.915	123.424	123.424
Consumo de combustível	6.930	6.930	8.561	8.561
Apoio	144.052	144.052	177.947	177.947
Custo Total por Semana	301.087	250.897	371.931	309.932
Custos Fixos da Divisao de Dragado = 12%				
CUSTO POR METRO CÚBICO	10,04	8,36	12,40	10,33

Fonte: ACP (2000).

(1) Ajustado com o Índice de preços industrial.

na = Não aplica

ANEXO B - Estrutura da matriz ou painel para a análise estatístico dos dados biofísicos da bacia do Canal do Panamá

I	ANO	SEDIMKM2	CFLORESTAL	AREAKM2	COMPTOKM	DECLIVGD	DDRENAGEM	FFHORTON	ESTDREN	PRECIPDMA	FIP10dm
Chagres	1	357,00	97,23	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	38,71	7,10
Chagres	2	718,00	97,10	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	39,40	9,98
Chagres	3	91,00	97,05	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	30,04	6,34
Chagres	4	236,00	97,01	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	33,27	7,11
Chagres	5	64,00	96,87	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	35,86	6,04
Chagres	6	80,50	96,83	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	37,19	9,33
Chagres	7	76,51	96,79	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	30,96	5,44
Chagres	8	661,39	96,66	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	38,87	8,78
Chagres	9	1.634,59	96,54	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	37,99	7,43
Chagres	10	228,45	96,57	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	33,68	6,52
Chagres	11	565,16	96,54	414,00	48,30	13,32	2,22	0,43	1,00	38,87	7,25
Pequení	1	576,00	97,91	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	48,46	11,58
Pequení	2	417,00	97,98	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	39,05	9,53
Pequení	3	317,00	95,85	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	36,49	8,49
Pequení	4	658,00	97,02	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	40,38	9,58
Pequení	5	253,00	96,92	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	38,56	8,03
Pequení	6	798,00	96,61	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	45,71	12,67
Pequení	7	57,71	96,60	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	35,86	6,91
Pequení	8	630,87	96,45	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	43,26	12,76
Pequení	9	1.323,32	96,32	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	46,63	11,68
Pequení	10	538,16	94,33	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	34,70	8,91
Pequení	11	1.080,00	94,10	135,00	26,50	11,42	2,27	0,44	2,00	46,02	11,96
Boquerón	1	635,00	68,52	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	45,26	10,46
Boquerón	2	350,00	68,39	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	36,86	8,72
Boquerón	3	327,00	68,54	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	31,45	8,30
Boquerón	4	428,00	69,04	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	32,04	7,50
Boquerón	5	194,00	68,11	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	34,69	6,89
Boquerón	6	891,00	67,83	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	41,85	11,29
Boquerón	7	208,88	67,36	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	29,31	6,43
Boquerón	8	584,13	67,41	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	38,62	11,78
Boquerón	9	866,09	67,40	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	42,67	11,60
Boquerón	10	299,00	66,55	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	31,13	8,78
Boquerón	11	1.049,18	66,51	91,00	22,30	12,41	1,99	0,51	2,00	42,69	11,82
Gatún	1	505,00	29,39	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	42,73	7,73
Gatún	2	294,00	27,90	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	38,24	8,53
Gatún	3	105,00	27,15	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	29,79	5,91
Gatún	4	114,00	27,02	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	29,91	7,06
Gatún	5	219,00	25,27	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	35,49	7,32
Gatún	6	350,00	24,42	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	37,26	8,39
Gatún	7	97,70	23,59	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	30,46	5,85
Gatún	8	392,88	22,67	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	34,48	8,48
Gatún	9	635,12	22,50	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	37,63	7,85
Gatún	10	297,40	21,70	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	28,73	7,02
Gatún	11	416,28	21,70	117,00	36,50	11,08	2,26	0,17	3,00	36,14	8,26
Trinidad	1	192,00	48,34	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	31,29	6,03
Trinidad	2	82,00	45,03	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	24,76	4,88
Trinidad	3	51,00	40,90	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	20,54	4,56
Trinidad	4	178,00	42,00	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	24,76	6,42
Trinidad	5	251,00	40,58	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	26,31	5,08
Trinidad	6	116,00	37,58	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	21,28	4,90
Trinidad	7	92,09	35,14	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	23,67	4,07
Trinidad	8	321,61	29,83	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	27,11	6,65
Trinidad	9	268,75	28,75	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	26,64	4,58
Trinidad	10	169,11	28,87	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	21,28	4,34
Trinidad	11	179,91	22,81	174,00	46,90	10,15	1,44	0,18	1,00	22,45	5,08
Cirí Grande	1	148,00	38,81	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	34,23	6,32
Cirí Grande	2	71,00	35,14	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	26,06	4,98
Cirí Grande	3	63,00	35,00	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	22,69	4,80
Cirí Grande	4	128,00	36,00	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	27,42	6,53
Cirí Grande	5	147,00	32,58	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	28,95	6,17
Cirí Grande	6	54,00	32,32	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	21,68	4,73
Cirí Grande	7	47,80	33,21	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	23,35	4,05
Cirí Grande	8	424,69	32,90	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	28,53	7,53
Cirí Grande	9	304,31	31,58	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	28,78	5,06
Cirí Grande	10	127,73	32,67	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	23,33	4,93
Cirí Grande	11	108,66	33,14	186,00	42,70	9,71	1,34	0,17	1,00	23,83	4,86
Caño Quebrado	1	229,60	17,60	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	24,31	6,98
Caño Quebrado	2	87,01	15,81	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	22,12	6,74
Caño Quebrado	3	50,13	15,26	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	15,90	6,65
Caño Quebrado	4	115,73	14,47	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	21,62	7,09
Caño Quebrado	5	115,00	13,94	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	23,01	6,66
Caño Quebrado	6	90,00	13,64	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	19,25	7,82
Caño Quebrado	7	89,90	13,76	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	19,86	5,66
Caño Quebrado	8	138,34	13,87	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	22,23	7,14
Caño Quebrado	9	253,91	12,25	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	28,31	7,67
Caño Quebrado	10	71,66	11,53	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	19,31	6,07
Caño Quebrado	11	117,31	11,33	67,00	19,70	3,46	1,96	0,37	2,00	19,26	6,83

I = Microbacia: Chagres (1), Pequení (2), Boquerón (3), Gatún (4), Trinidad (5), Cirí Grande (6) e Caño Quebrado (7)

T = Ano

SEDIMKM2 = Produção de sedimentos em toneladas por quilômetro quadrado (Fonte: Anuários Hidrológicos da ACP)

CFLORESTAL = Cobertura florestal em porcentagem da área total da microbacia (Fonte: Universidade Federal de Pelotas)

AREAKM2 = Área de la microbacia com medição hidrométrica em quilômetros quadrados (Fonte: Anuários Hidrológicos da ACP)

COMPTOKM = Comprimento do leito principal da microbacia em quilômetros (Fonte: ACP)

DECLIVGD = Declividade média da microbacia em graus (Fonte: Universidade Federal de Pelotas)

DDRENAGEM = Densidade de drenagem, ou seja, quilômetros de canais de drenagem por quilômetro quadrado (Fonte: ACP)

PRECIPDMA = Precipitação em decímetros anuais (Fonte: ACP)

FIP10dm = Fator de intensidade da precipitação. Corresponde a somatoria dos 10 dias mais chuvosos de cada ano para cada microbacia (Fonte: dados de precip)

FFHORTON = Fator de forma dimensional de Horton. Área da microbacia dividida pelo quadrado do comprimento do leito principal

ESTDREN = Estrutura de drenagem. 1) Dendrítica, 2) Retangular e 3) Paralela (Fonte: ACP e aportação própria do autor)

ANEXO C – Resultados dos test do fator de inflação da variância e test de White para detecção de colinearidade e heterocedastia, nos dados usados na regressão

Colinearidade (fator de inflação da variância -VIF)			Heterocedastia (test de White)	
Variavel	VIF	1/VIF	W = nR ²	chi2
estdren	464,07	0,002155	49,25	10,73
ddrenagem	302,95	0,003301		18,22
comptokm	217,29	0,004602		14,61
ffhorton	135,83	0,007362		16,08
declivgd	102,97	0,009711		21,84
cflorestal	99,94	0,010006		46,44
areakm2	44,71	0,022367		68,95
precipdma	9,22	0,108486		26,85
fip10dm	5,98	0,16728		6,54
Média	153,66		49,25	22,41

Nota: Se a média do VIF é maior que 1, existe colinearidade. Se W é maior que chi2, existe heterocedastia.

ANEXO D – Resultados das regressões sobre impacto do uso agrícola, pecuário e outros usos na produção de sedimentos na bacia do canal do Panamá

USO AGRICOLA

Linear regression, correlated panels corrected standard errors (PCSEs)

Group variable: i		Number of obs	=	77
Time variable: t		Number of groups	=	7
Panels: correlated (balanced)		Obs per group: min	=	11
Autocorrelation: no autocorrelation		avg	=	11
		max	=	11
Estimated covariances	=	28		
Estimated autocorrelations	=	0		
Estimated coefficients	=	10		
		R-squared	=	0.6285
		wald chi2(9)	=	173.09
		Prob > chi2	=	0.0000

sedimkm2	Coef.	Panel-corrected Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
agricola	32.25612	13.23441	2.44	0.015	6.317153	58.19509
areakm2	-6.829387	2.629869	-2.60	0.009	-11.98383	-1.674939
comptokm	27.38634	10.45212	2.62	0.009	6.900558	47.87212
declivgd	77.03706	46.8311	1.64	0.100	-14.7502	168.8243
ddrenagem	2497.008	1144.217	2.18	0.029	254.3833	4739.633
estdren	-1382.585	622.5941	-2.22	0.026	-2602.847	-162.3231
ffhorton	-713.8588	958.5386	-0.74	0.456	-2592.56	1164.842
precipdma	23.04155	10.87174	2.12	0.034	1.73333	44.34978
fip10dm	65.64832	36.23546	1.81	0.070	-5.371877	136.6685
_cons	-4316.356	1296.565	-3.33	0.001	-6857.576	-1775.136

USO PECUÁRIO

Linear regression, correlated panels corrected standard errors (PCSEs)

Group variable: i		Number of obs	=	77
Time variable: t		Number of groups	=	7
Panels: correlated (balanced)		Obs per group: min	=	11
Autocorrelation: no autocorrelation		avg	=	11
		max	=	11
Estimated covariances	=	28		
Estimated autocorrelations	=	0		
Estimated coefficients	=	10		
		R-squared	=	0.6272
		wald chi2(9)	=	158.74
		Prob > chi2	=	0.0000

sedimkm2	Coef.	Panel-corrected Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
pastagem	11.31587	3.685213	3.07	0.002	4.092981	18.53875
areakm2	.9584662	.7658646	1.25	0.211	-.5426008	2.459533
comptokm	-23.25414	16.55905	-1.40	0.160	-55.70928	9.201004
declivgd	25.82409	24.99701	1.03	0.302	-23.16915	74.81732
ddrenagem	248.75	271.2175	0.92	0.359	-282.8265	780.3265
estdren	-349.8177	184.0096	-1.90	0.057	-710.4699	10.83446
ffhorton	-664.69	781.6294	-0.85	0.395	-2196.656	867.2756
precipdma	22.84426	10.18179	2.24	0.025	2.88831	42.80021
fip10dm	67.32584	34.35344	1.96	0.050	-.0056688	134.6573
_cons	-436.0976	392.097	-1.11	0.266	-1204.594	332.3984

OUTROS USOS

Linear regression, correlated panels corrected standard errors (PCSEs)

Group variable: i		Number of obs	=	77
Time variable: t		Number of groups	=	7
Panels: correlated (balanced)		Obs per group: min	=	11
Autocorrelation: no autocorrelation		avg	=	11
		max	=	11
Estimated covariances	=	28		
Estimated autocorrelations	=	0		
Estimated coefficients	=	10		
		R-squared	=	0.6190
		wald chi2(9)	=	163.98
		Prob > chi2	=	0.0000

sedimkm2	Coef.	Panel-corrected Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
ousos	4.969558	2.92911	1.70	0.090	-.771391	10.71051
areakm2	-1.120426	.5310535	-2.11	0.035	-2.161272	-.0795803
comptokm	29.02566	10.37774	2.80	0.005	8.685667	49.36565
declivgd	-32.62409	25.8156	-1.26	0.206	-83.22175	17.97357
ddrenagem	-227.5496	261.5883	-0.87	0.384	-740.2533	285.1541
estdren	113.7574	139.5506	0.82	0.415	-159.7567	387.2716
ffhorton	1493.936	665.5115	2.24	0.025	189.5573	2798.314
precipdma	19.87216	10.19011	1.95	0.051	-.1000961	39.84442
fip10dm	74.49317	34.88149	2.14	0.033	6.126703	142.8596
_cons	-1591.6	358.5955	-4.44	0.000	-2294.434	-888.7654

ANEXO E – Resultados das regressões sobre impacto do uso florestal, agrícola e pecuário no escoamento superficial na bacia do canal do Panamá

USO FLORESTAL

Cross-sectional time-series FGLS regression

Coefficients: **generalized least squares**
 Panels: **heteroskedastic with cross-sectional correlation**
 Correlation: **no autocorrelation**

Estimated covariances	=	28	Number of obs	=	77
Estimated autocorrelations	=	0	Number of groups	=	7
Estimated coefficients	=	10	Time periods	=	11
			wald chi2(9)	=	3788.58
			Prob > chi2	=	0.0000

escsupmckm2	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
cflorestal	-133.2791	3495.271	-0.04	0.970	-6983.884	6717.326
areakm2	977.3495	673.5207	1.45	0.147	-342.7267	2297.426
comptokm	-81931.13	15031.85	-5.45	0.000	-111393	-52469.25
declivgd	101916.8	39461.1	2.58	0.010	24574.46	179259.1
ddrenagem	1146164	561773.5	2.04	0.041	45107.66	2247219
estdren	-1136759	352122.6	-3.23	0.001	-1826906	-446611.1
ffhorton	-4000811	1051372	-3.81	0.000	-6061463	-1940160
precipdma	79451.95	5648.262	14.07	0.000	68381.56	90522.34
fip10dm	37970.33	18813.26	2.02	0.044	1097.01	74843.64
_cons	1988984	312572.6	6.36	0.000	1376353	2601615

USO AGRÍCOLA

Cross-sectional time-series FGLS regression

Coefficients: **generalized least squares**
 Panels: **heteroskedastic with cross-sectional correlation**
 Correlation: **no autocorrelation**

Estimated covariances	=	28	Number of obs	=	77
Estimated autocorrelations	=	0	Number of groups	=	7
Estimated coefficients	=	10	Time periods	=	11
			wald chi2(9)	=	5907.37
			Prob > chi2	=	0.0000

escsupmckm2	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
agricola	51215.85	6460.686	7.93	0.000	38553.14	63878.56
areakm2	-8686.367	1327.263	-6.54	0.000	-11287.75	-6084.979
comptokm	-74255.2	9482.458	-7.83	0.000	-92840.48	-55669.93
declivgd	273040.2	27728.06	9.85	0.000	218694.2	327386.2
ddrenagem	5470009	598547.5	9.14	0.000	4296877	6643140
estdren	-3488250	331241.1	-10.53	0.000	-4137471	-2839030
ffhorton	-7095841	826612.5	-8.58	0.000	-8715972	-5475710
precipdma	86314.1	4798.083	17.99	0.000	76910.03	95718.17
fip10dm	28833.41	16224.18	1.78	0.076	-2965.393	60632.22
_cons	-2858012	655869	-4.36	0.000	-4143492	-1572533

USO PECUÁRIO

Cross-sectional time-series FGLS regression

Coefficients: **generalized least squares**
 Panels: **heteroskedastic with cross-sectional correlation**
 Correlation: **no autocorrelation**

Estimated covariances	=	28	Number of obs	=	77
Estimated autocorrelations	=	0	Number of groups	=	7
Estimated coefficients	=	10	Time periods	=	11
			wald chi2(9)	=	3770.21
			Prob > chi2	=	0.0000

escsupmckm2	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
pastagem	10769.54	3352.616	3.21	0.001	4198.538	17340.55
areakm2	2605.3	783.3874	3.33	0.001	1069.888	4140.711
comptokm	-124985.6	16885	-7.40	0.000	-158079.6	-91891.65
declivgd	154358.1	25508.98	6.05	0.000	104361.4	204354.8
ddrenagem	1582263	289904.6	5.46	0.000	1014060	2150465
estdren	-1554256	199922.6	-7.77	0.000	-1946097	-1162415
ffhorton	-5778451	935848	-6.17	0.000	-7612680	-3944223
precipdma	83500.13	5685.077	14.69	0.000	72357.58	94642.68
fip10dm	34900.08	18472.21	1.89	0.059	-1304.791	71104.95
_cons	2762922	376100.6	7.35	0.000	2025779	3500066

ANEXO F – Mapa da distribuição e localização do conjunto de microbacias com controle hidrométrico na bacia hidrográfica do Canal do Panamá

Fonte: Universidade Federal de Pelotas (2011).

Pequení (1), Boquerón (2), Gatún (3), Chagres (4), Trinidad (5), Cirí Grande (6) e Caño Quebrado (7).

ANEXO G – Mapa de cobertura vegetal da bacia hidrográfica do Canal do Panamá - 2003

Fonte: CICH (2006).

ANEXO H – Mapa da área de medição de sedimentos da microbacia do rio Chagres

Fonte: ACP (Anuario Hidrológico 2009).

ANEXO I – Mapa da área de medição de sedimentos da microbacia do rio Pequení

Fonte: ACP (Anuario Hidrológico 2009).

ANEXO J – Mapa da área de medição de sedimentos da microbacia do rio Boquerón

Fonte: ACP (Anuario Hidrológico 2009).

ANEXO K – Mapa da área de medição de sedimentos da microbacia do rio Gatún

Fonte: ACP (Anuario Hidrológico 2009).

Anexo L – Mapa da área de medição de sedimentos da microbacia do rio Trinidad

Fonte: ACP (Anuario Hidrológico 2009).

ANEXO M – Mapa da área de medição de sedimentos da microbacia do rio Ciri Grande

Fonte: ACP (Anuario Hidrológico 2009).