



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EVELINE MENEZES RODRIGUES DA SILVA**

**IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE SEDIMENTOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
FINGERPRINTING EM BACIA HIDROGRÁFICA NO SEMIÁRIDO**

**FORTALEZA**

**2015**

**EVELINE MENEZES RODRIGUES DA SILVA**

**IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE SEDIMENTOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
FINGERPRINTING EM BACIA HIDROGRÁFICA NO SEMIÁRIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.  
Orientador: Pedro Henrique Augusto Medeiros

**FORTALEZA**

**2015**

**EVELINE MENEZES RODRIGUES DA SILVA**

**IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE SEDIMENTOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
FINGERPRINTING EM BACIA HIDROGRÁFICA NO SEMIÁRIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.  
Orientador: Pedro Henrique Augusto Medeiros

Aprovado em: 10/04/2015

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Andrea Almeida Cavalcante  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me concedido o dom da vida, capacitar e me manter focada no meu projeto de vida.

Aos meus pais Sancho e Luiza, e ao meu irmão Túlio, pelo amor dedicado e por sempre apoiarem e respeitarem as minhas decisões.

A Eurípedes, o meu amor, meu marido, presente de Deus em minha vida. Agradeço pelo amor, por estarmos construindo nossa família, pelo companheirismo, bons conselhos, por me incentivar e sempre estar ao meu lado me oferecendo o seu abraço acolhedor.

Ao meu filho que está ainda tão pequenininho dentro de mim e que já cultivo tanto amor e dedicação.

A minha avó Vilani, a sabedoria e experiência de vida e que me ensinou a amar o conhecimento.

Aos meus tios e padrinhos João Everardo e Maria do Céu. As minhas queridas tias Cláudia, Fátima e Nanam, por sempre estarem presentes, que tanto me apoiaram e acreditaram no meu potencial.

A todos os meus primos e aos meus primos-irmãos Camila, Marcos Henrique e Isaac.

A minha cunhada Fabiana, pelos momentos compartilhados.

A minha querida amiga Luciana Monteiro, pela amizade verdadeira.

Ao Professor Pedro Henrique Augusto Medeiros, pela atenção, confiança, profissionalismo e pela orientação tão bem conduzida.

Ao co-orientador José Carlos de Araújo, pela constante disposição em contribuir com esta pesquisa, pelas discussões e sugestões enriquecedoras.

Aos membros da banca pelas valiosas contribuições científicas.

À Universidade Federal do Ceará por ter me proporcionado cursar uma pós-graduação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC (DENA).

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) instituição que deu suporte a esta pesquisa.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) do Departamento de Geologia da UFC.

A todos os amigos do Grupo de Pesquisa Hidrológica do semiárido (HIDROSED), em especial aos que foram mais presentes: Teresa, Cicero, Christine Farias, Cristine Viana, Socorro, Mário e Marina.

Aos amigos e colaboradores de campo: Cícero, Dona Socorro, Janaína e Seu Jaime.

Aos colegas de departamento pelo convívio e troca de informações. E aos colegas de turma: Elinalda, Neyson e Raul.

## RESUMO

A erosão, o transporte e a deposição de sedimentos são questões ambientais que afetam a sociedade, principalmente devido à redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios superficiais, acarretando a redução da disponibilidade hídrica e favorecendo inundações, também influenciando na produtividade agrícola e intensificando o processo de desertificação. O estudo dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia hidrográfica aplicando a técnica fingerprinting é uma ferramenta de apoio, possuindo uma vasta importância para a gestão ambiental, podendo ser um indicador das condições de uso e manejo da bacia. Esta pesquisa refere-se a um estudo de identificação das fontes de sedimentos realizado na bacia hidrográfica do Benguê (933 km<sup>2</sup>), situada na região Nordeste do semiárido brasileiro. A pesquisa explorou as potencialidades da aplicação da técnica fingerprinting na bacia, analisando a origem dos sedimentos erodidos a partir de comparações de propriedades físicas e mineralógicas das fontes potenciais de sedimentos e dos sedimentos de fundo do açude, objetivando o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de monitoramento e identificação das fontes de sedimentos que mais contribuem para o processo erosivo da bacia. O método baseou-se na utilização de variáveis químicas, obtidas por meio de análise mineralógicas, para discriminar as fontes de sedimentos e classificar o sedimento assoreado na passagem molhada e no açude Benguê, por meio de técnicas de análise estatística multivariada. Os resultados mostraram que a utilização da técnica fingerprinting tratou-se de uma ferramenta adequada para identificação das fontes de produção de sedimentos na bacia do Benguê. O presente estudo indicou que pelas propriedades traçadoras (físicas e mineralógicas) naturais dos sedimentos depositados na passagem molhada e no Açude Benguê que é possível identificar as fontes de sedimentos. Outra conclusão de elevada relevância, principalmente para o semiárido brasileiro, foi a utilização do material assoreado na identificação das fontes de sedimentos.

**Palavras-chave:** Identificação de fontes de produção de sedimentos. Semiárido brasileiro. Aproximação fingerprinting.

## ABSTRACT

The erosion, transport and deposition of sediments are environmental issues that affect society, mainly due to reduced storage capacity of surface reservoirs, resulting in a lower water availability and favoring floods, also influencing the agricultural productivity and intensifying the process of desertification. The study of hydrosedimentological processes in a watershed applying the fingerprinting technique is a support tool, having a wide importance for environmental management, and may be an indicator of the use and management conditions of the basin. This research refers to a study of identification of sediment sources conducted in the watershed of Benguê (933 km<sup>2</sup>), located in the northeast of the Brazilian semi-arid region. The research explored the potential application of the fingerprinting technique in the basin, analyzing the origin of the sediment eroded from comparisons of physical and mineralogical properties of the potential sources of sediment and dam of bottom sediments, aimed at the development and improvement of monitoring techniques and identification of sediment sources that contribute most to the erosion of the basin. The method is based on the use of chemical variables, obtained by mineralogical analysis to discriminate the sources of sediment and the sediment silted classifying the wet passage and the reservoir Bengue through multivariate statistical analysis. The results showed that the use of fingerprinting technique treated is a suitable tool for the identification of sources of sediment yield in watershed Bengue. This study indicated that the tracer properties (physical and mineralogical) natural sediments deposited on the wet passage and Weir Benguê that it is possible to identify the sources of sediment. Another finding highly relevant, especially for the Brazilian semiarid, was the use of silted material in the identification of sediment sources.

**Keywords:** Sediment sources types. Brazilian semiarid region. Composite fingerprinting technique.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 01</b>	Bacia do Açude Benguê, com indicação da seção Aroeira.....	<b>26</b>
<b>Figura 02</b>	Passagem molhada na seção Aroeira .....	<b>27</b>
<b>Figura 03</b>	Mapa de solos da Bacia do Açude Benguê .....	<b>29</b>
<b>Figura 04</b>	Pontos de coleta na Bacia do Açude Benguê.....	<b>33</b>
<b>Figura 05</b>	Possível fonte de sedimentos.....	<b>34</b>
<b>Figura 06</b>	Desenho esquemático do amostrador.....	<b>34</b>
<b>Figura 07</b>	Amostrador instalado na seção do rio principal da bacia.....	<b>35</b>
<b>Figura 08</b>	MEV da superfície e EDS das amostras de solo.....	<b>38</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b>	Fonte potencial de produção de sedimentos.....	<b>32</b>
<b>Tabela 02</b>	Proveniência do material assoreado.....	<b>45</b>
<b>Tabela 03</b>	Concentrações médias das variáveis químicas .....	<b>46</b>
<b>Tabela 04</b>	Variáveis selecionadas pelo teste kruskal-wallis.....	<b>47</b>
<b>Tabela 05</b>	Contribuição relativa das fontes passagem molhada.....	<b>49</b>
<b>Tabela 06</b>	Contribuição relativa das fontes açude Benguê.....	<b>50</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 01</b>	Análise granulométrica.....	<b>43</b>
-------------------	-----------------------------	-----------

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 01</b>	Correções das concentrações das granulometrias.....	<b>39</b>
<b>Equação 02</b>	Teste de Kruskal-Wallis.....	<b>39</b>
<b>Equação 03</b>	Concentração das variáveis químicas.....	<b>41</b>
<b>Equação 04</b>	Função objetiva de otimização.....	<b>41</b>
<b>Equação 05</b>	Contribuição de cada fonte valor não negativo.....	<b>41</b>
<b>Equação 06</b>	Somatório de contribuição de cada fonte.....	<b>41</b>

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	14
2	<b>OBJETIVOS.....</b>	16
3	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	17
3.1	<b>Processos hidrossedimentológicos.....</b>	17
3.2	<b>Identificação das fontes de sedimentos.....</b>	19
3.2	<b>Análise mineralógica.....</b>	24
4	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	26
5	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	32
5.1	<b>Amostragem.....</b>	32
5.2	<b>Caracterização mineralógica e física da amostra.....</b>	36
5.3	<b>Discriminação das fontes de sedimentos.....</b>	39
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	43
6.1	<b>Caracterização física da amostra.....</b>	43
6.2	<b>Caracterização mineralógica.....</b>	44
6.3	<b>Elementos discriminantes das fontes e passagem molhada.....</b>	45
6.4	<b>Identificação das fontes de sedimentos.....</b>	48
7	<b>CONCLUSÕES.....</b>	52
	<b>REFERÊNCIA.....</b>	54

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento agrícola e urbano e a consequente ocupação das bacias hidrográficas, com alteração do uso do solo, promovem grande impacto negativo ambiental e socioeconômico que é a erosão e o aporte de sedimentos aos rios e reservatórios superficiais. Os processos erosivos têm causas naturais, porém são fortemente intensificados por ações antrópicas, especialmente devido à ocupação desordenada e à utilização de práticas inadequadas na agricultura (MEDEIROS; ARAÚJO, 2014). A erosão, o transporte e a deposição de sedimentos são questões ambientais que afetam a sociedade, principalmente devido à redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios superficiais, acarretando a redução da disponibilidade hídrica e favorecendo inundações, também influenciando na produtividade agrícola e intensificando o processo de desertificação.

O estudo dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia hidrográfica é uma ferramenta de apoio possuindo uma vasta importância para a gestão ambiental, podendo ser um indicador das condições de uso e manejo da bacia. Em regiões semiáridas, os processos erosivos são particularmente expressivos devido às elevadas intensidades com que ocorrem as precipitações e a exposição frequente do solo devido à vegetação esparsa e o seu caráter xerófilo (MEGNOUNIF et. al., 2007). O aporte de sedimentos em reservatórios superficiais decorrente da erosão dos solos na bacia hidrográfica contribuinte tem impactos significativos na disponibilidade hídrica no Nordeste do Brasil, aproximadamente 90% da água utilizada para abastecimento humano são armazenadas nessas estruturas (ARAÚJO et. al., 2004).

O assoreamento de reservatórios causa a redução da sua capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, sua capacidade de regularizar vazões (MEDEIROS, 2009). O aporte de sedimentos também provoca um aumento na concentração de sólidos em suspensão, aumentando a turbidez e proporcionando uma redução na taxa de incidência dos raios solares, reduzindo também a produção primária e conseqüentemente alterações nas concentrações de oxigênio dissolvido. Em muitas áreas do mundo, o controle da erosão do solo e da transferência de sedimentos para os cursos de água é considerado de extrema importância para a redução de entrada de nutrientes e demais poluentes nos corpos hídricos.

No semiárido o grande desafio para o monitoramento da produção de sedimentos diz respeito à baixa frequência dos eventos naturais, dificultando a análise das respostas hidrossedimentológicas a estes eventos. Mas é necessário implantar programas de monitoramento de bacias hidrográficas estudando aspectos referentes à hidrologia, à

qualidade de água e à produção de sedimentos. As características de quantidade e qualidade dos sedimentos que chegam aos rios, além de informar sobre o estado da bacia hidrográfica, apresentam grande relevância para a manutenção dos ecossistemas, planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos de uma região (SOUZA et. al., 2006).

Collins e Walling (2002) ressaltam que, desde o início dos anos 2000, a atenção se volta aos estudos direcionados para o desenvolvimento de métodos que possibilitem a identificação das fontes de produção de sedimentos. O desprendimento e transporte das partículas de solo (diversas fontes) ocorrem em toda a bacia, e os sedimentos transitam em suspensão e/ou arraste pela calha fluvial. A proporção com que cada uma dessas fontes contribui é variável no tempo e no espaço. Um dos métodos mais promissores para identificar a origem dos sedimentos que têm se destacado pela eficiência é a técnica fingerprinting (COLLINS et al., 1997; COLLINS; WALLING, 2002; PEART, 2005). Esta se baseia no princípio de que os sedimentos em suspensão mantêm algumas de suas propriedades geoquímicas e mineralógicas adquiridas nas fontes, sendo essas propriedades utilizadas como traçadores. O conhecimento das fontes de sedimentos proporciona uma gestão sustentável na bacia hidrográfica, permitindo também uma melhor compreensão do fluxo de água e sedimentos.

O trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do açude Benguê (933 km<sup>2</sup>), situada na região Nordeste no semiárido brasileiro. A pesquisa explorou as potencialidades da aplicação da técnica fingerprinting na bacia, analisando a origem dos sedimentos erodidos a partir de comparações de propriedades físicas e mineralógicas das fontes potenciais de sedimentos e dos sedimentos de fundo do açude, objetivando o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de monitoramento e identificação das fontes de sedimentos que mais contribuem para o processo erosivo da bacia.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Identificar a origem dos sedimentos erodidos na bacia do Açude Benguê, no Ceará, por comparação de propriedades mineralógicas das fontes potenciais com os sedimentos coletados próximo ao exutório da bacia.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar as características físicas e mineralógicas dos solos da região para a discriminação das fontes;
- Analisar as propriedades traçadoras naturais dos sedimentos depositados na passagem molhada a montante do açude Benguê e no próprio açude objetivando identificar as fontes, baseado na comparação das características mineralógicas das fontes e dos sedimentos, por meio de métodos estatísticos multivariados (aproximação fingerprinting);
- Compreender as condições de transporte de sedimentos na Bacia do Benguê;
- Aprimorar as técnicas de monitoramento dos sedimentos na bacia em estudo para as condições hidrológicas do semiárido brasileiro.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Processos hidrossedimentológicos

A erosão do solo pela ação da água e a transferência de sedimentos são reconhecidos como importantes causadores da degradação ambiental. O conhecimento da sua distribuição espacial e temporal é essencial para gestão da bacia hidrográfica, sua conservação e manejo (MEDEIROS; de ARAÚJO, 2014). A erosão está relacionada aos processos de desgaste da superfície do terreno. Segundo Merrit et al. (2003), o processo de redistribuição do solo pode ser descrito em três estágios: desprendimento (erosão), transporte e deposição. As vertentes ou interflúvios são tidas como áreas de captação, geração de escoamento e produção de sedimentos. Já a calha aluvial local, onde ocorre a concentração do escoamento, tem como função transportar, até o exutório da bacia, água e sedimento que são produzidos nas vertentes e também os que são produzidos na própria calha. Por fim, as planícies fluviais ou várzeas que margeiam as calhas agem como receptores temporários dos sedimentos que são produzidos a montante.

A erosão hídrica promove a desagregação e o deslocamento de partículas sólidas, por meio da energia do impacto da gota da chuva no solo e das forças geradas devido ação do escoamento das águas sobre o solo. Uma vez desprendidas as partículas da massa de solo, as mesmas são carreadas principalmente pelo fluxo da água ao longo da vertente, quer seja em suspensão ou por arraste, havendo uma pequena parcela transportada pelo próprio impacto da chuva (GUERRA, 2005). Os processos erosivos são agentes que modelam de forma natural o relevo, atuando conjuntamente com processos de desmembramento de rochas e formação dos solos.

Os processos erosivos são comumente denominados de naturais ou geológicos, porém devido à interferência humana, que inviabiliza a recuperação natural do meio, inicia-se a erosão acelerada ou antrópica. Esta se processa a uma velocidade geralmente superior às perdas toleráveis de solo. A degradação do solo das bacias hidrográficas, principalmente pela ação antrópica, resulta na mobilização de sedimentos em quantidades maiores que as produzidas em centenas de anos em condições de equilíbrio natural (SIMÕES; COIADO, 2001). Entre as atividades que mais afetam o ciclo hidrossedimentológico destacam-se o desmatamento, a agropecuária, a urbanização, a mineração, a construção de estradas, a retificação e o barramento de cursos de água (MINELLA et. al., 2009).

Merten e Minella (2002) ressaltam que a visão cartesiana, segmentada, dos processos hidrossedimentológicos associados à erosão hídrica em bacias hidrográficas não é eficiente para resolver os problemas ocasionados pela erosão e a presença de sedimentos nas calhas dos rios. Isto se deve ao pouco conhecimento dos processos de ligação entre a vertente e a calha dos rios. Os autores salientam que, para haver um controle dos processos erosivos, de forma completa e eficaz, deve ser exercida a integração de conhecimentos da engenharia, agronomia e ecologia, não apenas unindo, mas explorando as inter-relações que indicarão o caminho para o controle eficaz e sustentável da erosão hídrica em bacias hidrográficas.

Walling (1990) afirma que a compreensão dos processos de ligação entre a vertente e a calha aluvial permite que haja uma melhor interpretação das relações entre uso e manejo do solo e a presença de sedimentos e poluentes em rios, lagos e reservatórios. Para que isso seja possível há três aspectos que merecem destaque: a identificação das fontes de sedimentos, a dinâmica da distribuição dos sedimentos na bacia hidrográfica e a avaliação qualitativa dos sedimentos.

O presente trabalho tem como objetivo identificar as fontes produtoras de sedimento, avaliando como as fontes contribuem na produção de sedimentos para a calha do rio. Segundo Walling (1990), seus estudos salientam que identificar e obter informações da fonte dominante de sedimentos é um pré-requisito fundamental para qualquer investigação da dinâmica dos sedimentos e da recuperação de áreas afetadas pela erosão hídrica.

### *3.1.1 Produção de sedimentos*

O crescimento agrícola e urbano, com a ocupação desordenada das bacias hidrográficas gera um dos maiores impactos negativos ambientais e socioeconômicos que é a erosão e produção de sedimentos. Denomina-se produção de sedimentos a quantidade de sedimentos que é removida para fora de determinada área de drenagem considerada (CARVALHO, 2008) em um determinado intervalo de tempo. Coleman e Scatena (1986) afirmam que a identificação de áreas específicas que contribuem ativamente com sedimentos para a rede de drenagem é um pré-requisito necessário para a compreensão do processo de produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica.

O sedimento é composto de muitos materiais, incluindo partículas primárias individuais, agregados orgânicos e químicos associados. As propriedades dos sedimentos são inerentes a cada partícula individual ou agregada e como se comporta no fluxo da água. O

tamanho, a forma e a densidade afetam a velocidade de sedimentação, afetando a taxa de transporte de sedimentos e em quais pontos as partículas se depositam.

De Vente et al. (2008), definem produção de sedimentos como parte do material erodido, originado de processos de erosão do solo que são transportados além de um ponto de referência da bacia. Segundo Minella e Merten (2006), a produção de sedimentos representa uma parcela do total de solo que foi erodido e mobilizado em uma bacia em decorrência de todos os processos erosivos atuantes. A erosão do solo depende da topografia local, das propriedades do solo, do clima e da cobertura vegetal, enquanto o transporte é influenciado pela morfologia da bacia, por características da rede de drenagem e uso do solo (VERSTRAETEN; POESEN, 2001).

A estimativa da produção de sedimentos é essencial para a compreensão das relações entre variabilidade natural e mudanças antropogênicas, e como esses fatores influenciam o transporte de água e sedimentos em bacias hidrográficas (RESTREPO et al., 2006). A estimativa da produção de sedimentos pode ser determinada avaliando a erosão, o transporte e a deposição, mas geralmente, as medidas são realizadas diretamente pelo monitoramento da descarga total de sedimentos transportados pelo canal no exutório da bacia durante um período de tempo.

### **3.2 Identificação das fontes de sedimentos**

#### *3.2.1 Aspectos gerais*

Segundo Minella et al. (2009), a capacidade de compreensão de como os processos hidrossedimentológicos de uma bacia hidrográfica respondem aos efeitos de uso e manejo do solo depende, fundamentalmente, do monitoramento adequado de variáveis que estão envolvidas no processo. Nos processos hidrossedimentológicos, as principais variáveis são a precipitação, a vazão e o fluxo de sedimentos.

O monitoramento dos processos hidrossedimentológicos de maneira distribuída nas bacias hidrográficas é logisticamente e financeiramente inviável, portanto as medições se concentram no exutório da bacia, onde os processos e distúrbios que ocorrem na escala de vertente são integrados com aqueles que ocorrem na calha fluvial e expressos em termos de alterações na descarga líquida e sólida na produção de sedimentos (MINELLA; MERTEN, 2011).

A medição do fluxo de sedimentos é realizada utilizando-se diferentes métodos, em função principalmente da escala temporal, mas também da área de abrangência do estudo (de ARAÚJO; KNIGHT, 2005), sendo que a qualidade dos resultados será melhor quanto maior for a frequência de amostragem. Walling (1990) salienta que a frequência de amostragem afeta sensivelmente a estimativa do fluxo de sedimentos em suspensão. O autor ressalta que além do monitoramento hidrossedimentométricos no exutório da bacia, também é necessário qualificar e quantificar as fontes dominantes de sedimentos.

Vários autores (HOROWITZ, 1991; COLLINS; WALLING, 2002; MINELLA et al., 2009; GUZMAN et.al., 2013; GELLIS; MUKUNDAN, 2013) têm desenvolvido pesquisas relacionadas à dinâmica dos sedimentos em bacias hidrográficas avaliando como as diversas fontes contribuem para a calha dos rios. De posse dessa informação, é possível compreender os mecanismos de transporte dos sólidos dissolvidos, contaminantes e nutrientes pelo sedimento.

Há métodos diretos e indiretos para identificação das fontes de sedimentos. Nos métodos diretos, o princípio fundamental é utilizar as características dos solos das fontes e comparar com as dos sedimentos em suspensão coletadas nos rios. Os métodos indiretos estão baseados na utilização de modelos empíricos ou de base física para verificar a localização das fontes de sedimentos. Os métodos indiretos podem ser subdivididos em qualitativos e quali-quantitativos. O qualitativo consiste em identificar as fontes, mas não quantifica as perdas de solo. Os quali-quantitativos, além de identificar, visam estimar as perdas de solo. Esses estão baseados na utilização de modelos matemáticos espacialmente distribuídos que estimam a erosão bruta nas vertentes e a descarga sólida no exutório da bacia, e conseqüentemente a razão de aporte de sedimentos (WALLING, 1990), tal como realizado por Medeiros et al. (2010).

Quanto aos métodos diretos, eles são úteis e importantes para a modelagem dos processos erosivos e ambientais numa bacia hidrográfica. Wolman (1977) propôs um método direto de identificação da principal fonte de sedimentos em bacias hidrográficas, o qual explorava as propriedades magnéticas e geoquímicas dos sedimentos, realizando uma investigação detalhada dos sedimentos em suspensão no leito do rio e das propriedades nas fontes.

Segundo Minella et. al (2006), algumas características do solo e dos sedimentos apresentam propriedades traçadoras, podendo utilizar os elementos traços naturais (Fe, Mn, Pb, Zn, Co, Cr, Cu, Al, C, P, N, Ca, Na, etc.), estes que são mais frequentes e as análises

apresentam menores custos. A viabilidade e a eficiência da modelagem direta dependem da conservatividade desses elementos e da sua capacidade de distinguir as diferentes fontes. Consequentemente, um dos principais pressupostos para utilização das características dos solos e dos sedimentos erodidos nessa metodologia é que os elementos erodidos devem manter na sua estrutura as mesmas características do elemento ou a característica traçadora presente na fonte. Para escolher um bom traçador deve-se observar o seu comportamento no ambiente. Cada elemento químico ou substância apresenta um comportamento diferente aos inúmeros fatores ambientais que influenciam nesse percurso, e as taxas de enriquecimento e depleção podem comprometer a aplicação do método direto. O aprimoramento dos métodos analíticos de avaliação das propriedades magnéticas e composição mineral proporcionou o desenvolvimento das técnicas de identificação das fontes de sedimentos.

### *3.2.2 Aproximação fingerprinting de identificação de fontes de sedimentos*

Collins (1995) define a técnica fingerprinting (técnica de identificação de fontes de sedimentos) como técnica que objetiva elucidar a origem das fontes de sedimentos pela análise detalhada de várias propriedades numa determinada escala espacial e temporal. O fundamento teórico para o desenvolvimento da técnica fingerprinting foi a investigação detalhada de propriedades naturais encontradas nos solos das fontes que poderiam ser comparadas com as variações das mesmas propriedades no fluxo de sedimentos em suspensão, buscando identificar por métodos diretos de comparação as características físicas e químicas dos sedimentos transportados nos rios. A técnica fingerprinting de identificação das fontes de sedimentos baseia-se na utilização de elementos traços naturais, tendo se tornado possível devido à evolução do conhecimento dos métodos analíticos de determinação das propriedades magnéticas e composição mineral, e também à incorporação de técnicas de estatísticas multivariadas. Walling (2013) afirma que a técnica fingerprinting para a identificação das fontes de sedimentos aplicada em sistemas fluviais tem por objetivo fornecer informações pertinentes aos sedimentos transportados por um rio, sendo isso possível quando se coleta amostras do sedimento transportado no rio e compara com suas propriedades físicas ou geoquímicas com as fontes potenciais da área da bacia.

Walling (2013) ressalta como tem aumentado exponencialmente desde a década de 1970 as publicações sobre a técnica de identificação de sedimentos por aproximação fingerprinting. O autor lista os avanços fundamentais sobre o método fingerprinting ao longo dos últimos 30 anos que incluem o uso da identificação múltipla ou composta, testes

estatísticos e modelos, tamanho e fator de correção e melhores estimativas de incertezas. Gellis e Mukundan (2013) afirmam que a utilização da técnica fingerprinting para a identificação das fontes de sedimentos utilizando características geoquímicas e físicas dos sedimentos está se tornando cada vez mais popular.

Segundo Minella e Merten (2011), as principais vantagens, científicas e aplicadas, apresentadas pelas técnicas de identificação das fontes de sedimentos erodidos são:

- Identificação dos locais geradores de sedimentos na bacia e a quantidade de sedimento erodido;
- Contribuição para o desenvolvimento de modelos distribuídos de produção de sedimentos, os quais são bastante úteis para a interpretação de dados de produção de sedimentos e sua previsão;
- Contribuição para o entendimento da dinâmica dos sedimentos em bacias, o qual permite determinar a redistribuição de sedimentos na bacia e contribuir para o entendimento dos mecanismos de Razão de Aporte de Sedimentos (RAS);
- Proposição de uma metodologia eficiente para a caracterização dos sedimentos em suspensão, pois as características dos sedimentos nos rios são uma mistura dos solos das fontes;
- Desenvolvimento de programas de manejo integrado de bacias hidrográficas;
- Levantamento do potencial poluidor de diferentes fontes e delineamento de estratégias efetivas para o controle de erosão e poluição pontual e difusa buscando a recuperação de rios afetados pela presença de poluentes e sedimentos.

A técnica fingerprinting de identificação das fontes de sedimentos foi sendo aperfeiçoada ao longo dos anos e utilizada amplamente por pesquisadores em vários locais do planeta (por exemplo, WALLING; WOODWARD, 1995; MINELLA et. al., 2007; BALLANTINE et. al., 2009; BIRD et. al., 2010; BROSINSKY et. al., 2014). Walling et. al. (1993) afirmam que a técnica fingerprinting oferece uma abordagem alternativa para identificação das fontes de sedimentos, sendo que a técnica consiste em utilizar as propriedades dos sedimentos para rastrear as fontes. Isso envolve primeiramente a seleção de propriedades físicas, químicas, mineralógicas, radiométricas, geoquímicas, entre outras que diferencie o material das fontes. A técnica é essencialmente simples, no entanto deve-se ter cuidado ao selecionar as propriedades para distinguir as fontes de forma inequívoca (WALLING; WOODWARD, 1995). Segundo Minella et. al. (2009), os estudos iniciais de

identificação das fontes de sedimentos apresentavam resultados essencialmente qualitativos, mostrando quais fontes seriam as mais importantes e, também, na descrição de mudanças que podem ocorrer durante os eventos ou entre estações do ano. Na década de 1970 foi proposto um método direto de identificação da principal fonte de sedimentos em bacias hidrográficas, o qual explorava as propriedades magnéticas e geoquímicas dos sedimentos e foi visto como barato, rápido e eficiente. No entanto, as pesquisas não avaliavam a quantidade de sedimentos provenientes de cada fonte. A partir do final da década de 1980 passou-se a incorporar métodos quantitativos, estes bastante úteis na identificação da contribuição das fontes na produção de sedimentos (MINELLA; MERTEN, 2011).

Bunte e Macdonald (1999) explanam que o desenvolvimento de técnicas que utilizam as características próprias de cada tipo de solo tem melhorado a habilidade para identificar as fontes de sedimentos finos e distinguir a relativa contribuição das diferentes fontes e sua produção total. Os autores procuraram verificar por meio de propriedades indicadoras presentes nos sedimentos uma relação entre as fontes em potencial de sedimentos com os sedimentos em suspensão monitorados em trechos do leito de um rio ou no exutório da bacia. Boer e Crosby (1995) buscaram por meio da microscopia eletrônica de varredura e do espectrômetro de energia dispersiva identificar as fontes de sedimentos, analisando o tamanho das partículas, constituição química, morfologia e mineralogia. Já Brosinsky et. al. (2014) utilizaram as propriedades espectrais dos sedimentos na aplicação da técnica fingerprinting, sendo que a espectroscopia é um método de análise bem mais simples e menos dispendioso que as análises geoquímicas, possibilitando as medições em pequenas quantidades de sedimentos.

Yu e Oldfield (1989) propuseram um modelo estatístico multivariado para análise de nove propriedades magnéticas dos sedimentos erodidos em seis diferentes fontes. Os autores desenvolveram uma modelagem que ofereceu um método sequencial para a identificação das fontes de sedimentos. A pesquisa buscou inicialmente separar estatisticamente as fontes de sedimentos por meio de parâmetros discriminantes, observando quais características dos sedimentos tinham capacidade de separar as fontes estatisticamente. Posteriormente foi desenvolvido um modelo linear multivariado de regressão que visava estabelecer a contribuição de cada fonte que representaria a concentração observada nos sedimentos em suspensão. O modelo é condicionado a uma rotina de minimização de erros pelo método dos mínimos quadrados. Minella et. al. (2009) afirmam que essa pesquisa elucidou o fato de que cálculos quantitativos são mais úteis que as descrições puramente

qualitativas, permitindo identificar quais fontes estão contribuindo para a descarga sólida no rio e quanto material está saindo destes locais.

As pesquisas de Walling et. al. (1993) e Walling e Woodward (1995) contribuíram para o refinamento do modelo multivariado de classificação dos sedimentos. Com o aumento no potencial de cálculo dos modelos multivariados de classificação, surgiu a necessidade de procedimentos estatísticos mais rebuscados para selecionar as propriedades traçadoras para serem inseridas no modelo. Com isso houve a incorporação de análises estatísticas para testar a habilidade individual de propriedades traçadoras para discriminar as fontes e para selecionar as propriedades a serem utilizadas no modelo multivariado de classificação.

Para a seleção das propriedades individuais e a utilização de funções discriminantes para a análise do melhor conjunto de propriedades, foi proposta a utilização do teste não-paramétrico Kruskal-Wallis (WALLING; COLLINS, 2000). Essa etapa estatística objetiva maximizar a capacidade discriminante e diminuir a dimensionalidade do problema. Minella et. al. (2009) ressaltam que essas contribuições são consideradas um grande avanço metodológico no desenvolvimento das técnicas de identificação de fontes.

### **3.3 Análise mineralógica**

O estudo da origem e formação do solo vem se desenvolvendo significativamente com o auxílio da mineralogia, que busca conhecer e caracterizar as diferentes classes de solos, essas originadas pelas múltiplas relações que se estabelecem entre seus fatores de formação. Mata et al. (2011) afirmam que a análise mineralógica do solo permite o reconhecimento qualitativo e quantitativo dos constituintes minerais nas diferentes frações texturais, ou seja, areia, silte e argila. O uso da mineralogia como ferramenta para a avaliação das propriedades dos minerais que compõem o solo é extremamente importante para o entendimento das diferentes relações químicas e físicas que ocorrem nele (REMUS et. al., 2008).

Segundo Araújo (2012) a identificação, a caracterização e o entendimento das propriedades dos diferentes minerais do solo ajudam na avaliação da sua gênese e nas suas propriedades relacionadas com a classificação agrônômica. Hillel (2003) cita que a análise mineralógica é o estudo de materiais para determinar a composição mineral e a sua estrutura. Essas análises podem ser utilizadas para identificar espécies de minerais e compreender suas características e propriedades, sendo que as propriedades mineralógicas podem ser utilizadas

na identificação das fontes de sedimentos. No entanto, não é comum o uso da mineralogia para esse tipo de estudo (REMUS et. al., 2008).

Boer e Crosby (1995) utilizaram a microscopia eletrônica de varredura e a espectroscopia para identificar as fontes de sedimentos analisando as propriedades mineralógicas dos sedimentos. As análises MEV/EDS (microscopia eletrônica de varredura/espectroscopia de energia dispersiva) fornecem informações sobre a distribuição do tamanho, mineralogia e a morfologia da partícula.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica utilizada tanto para pesquisas básicas quanto como aplicadas. Esta técnica permite a observação de diferentes tipos de materiais tais como: mineral, vegetal, entre outros, a partir da emissão e interação de feixes de elétrons sobre uma amostra, sendo possível caracterizá-los do ponto de vista de sua morfologia, sua organização e composição química (SANTOS et. al., 2003).

O uso desta técnica vem se tornando mais frequente por fornecer informações de detalhes, com aumento de até 300.000 vezes. A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons na amostra, sob condições de vácuo, provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação dos elétrons com a amostra. Os sinais emitidos encontram-se sob a forma de elétrons (secundários, retroespalhados, absorvidos, transmitidos, difratados, etc.) e de fótons (fotoluminescentes e raio X), os quais são captados por detectores apropriados, sendo amplificados e processados num sistema analisador específico para cada tipo de sinal.

Ao MEV pode ser acoplado o sistema EDS (Energy Dispersive System), o qual permite a análise composicional dos materiais, sendo possível a quantificação dos elementos presentes em porcentagem atômica ou em peso. O detector de energia dispersiva funciona a partir da emissão dos raios X característicos.

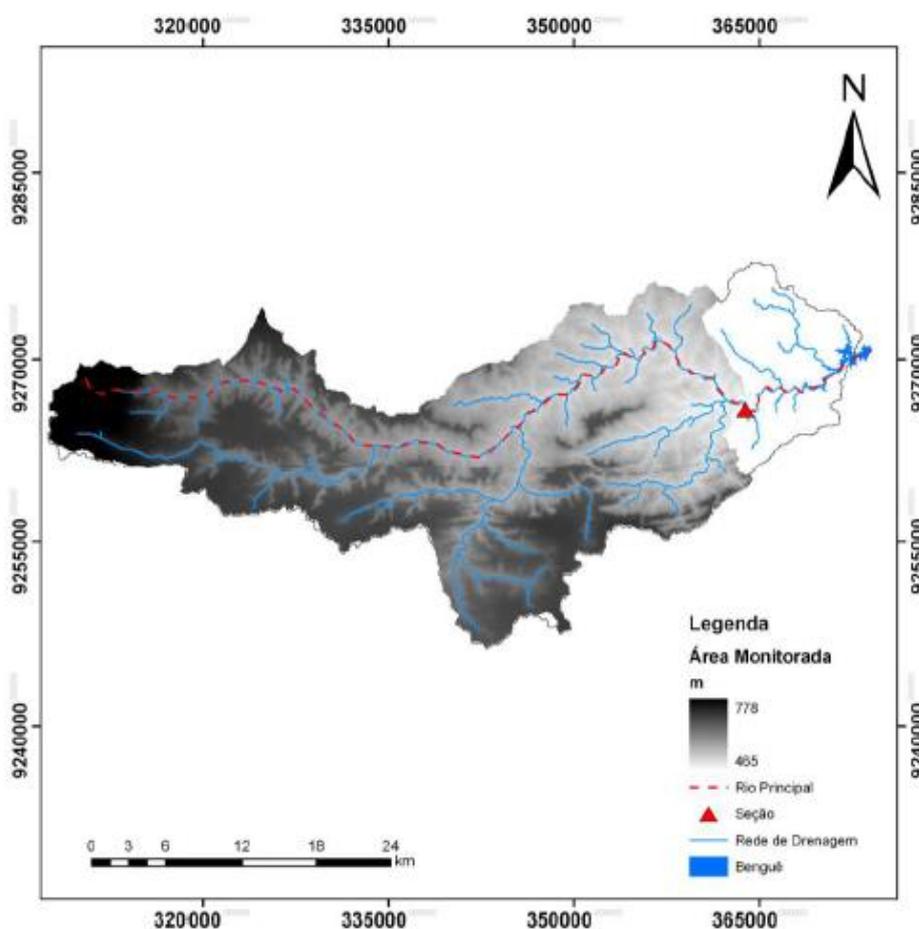
Segundo Duarte et. al. (2003), uma das vantagens da utilização do MEV/ EDS é a rapidez e facilidade na preparação das amostras, estas que dependem do objetivo da pesquisa.

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Açude Benguê, inserida na Bacia do Alto Jaguaribe (BAJ), localizada no município de Aiuaba, Ceará. O município de Aiuaba localiza-se na região dos Inhamus, a sudoeste do Estado. A bacia do Açude Benguê possui uma área de captação de aproximadamente 933 km<sup>2</sup>, sendo controlada pelo Açude Benguê, com capacidade de armazenamento de 19,6 hm<sup>3</sup>. O açude Benguê é utilizado para o abastecimento da sede municipal de Aiuaba, sendo responsável também pela perenização de um trecho do Rio Umbuzeiro a jusante da barragem.

A seção de monitoramento dos sedimentos em suspensão foi a Aroeira, localizada no rio principal da Bacia do Benguê, o Rio Umbuzeiro, este com um comprimento de 78 km, sendo que a área controlada pela seção corresponde a 800 km<sup>2</sup> (Figura 1 e Figura 2). De acordo com o sistema de coordenadas UTM (Zona 24S, Datum SIRGAS 2000), a seção está localizada nas seguintes coordenadas, 9265951 N e 363772 E.

**Figura 1** – Bacia do Açude Benguê, com indicação da seção Aroeira.



**Figura 2** – Passagem molhada na seção Aroeira.



Fonte: AUTORA.

A área de estudo está inserida em uma das regiões mais secas do país (MEDEIROS; de ARAÚJO, 2014). O clima na região é tropical semiárido, com um índice pluviométrico anual médio de 600 mm e evaporação média anual de aproximadamente 2.500 mm. Apresenta um período chuvoso bem definido entre os meses de janeiro e maio, que é responsável por mais de 80% da precipitação anual, 46% ocorrem durante os meses de março e abril (MEDEIROS, 2009). As chuvas têm caráter convectivo, com elevada intensidade e curta duração. Caracterizado por uma alta variabilidade interanual da precipitação pluviométrica com o coeficiente de variação de 0,40 para precipitação anual e 1,20 do escoamento anual (MEDEIROS; de ARAÚJO, 2014).

Na bacia do Açude Benguê a elevação varia de 375 a 785 metros acima do nível do mar, sendo as maiores altitudes verificadas nos planaltos situados na borda sul e oeste da bacia. Nessas áreas, predominam declividades inferiores a 2%. Nas proximidades do exutório também se verificam baixas declividades, de até 5%, enquanto que na borda sudeste estas podem superar 25% (MEDEIROS, 2009).

No que tange aos seus aspectos geomorfológicos, a bacia do Benguê está situada numa zona de transição, com a ocorrência da Unidade dos Sertões nas regiões central e

oriental da bacia, e dos Altos Planaltos Sedimentares nas bordas sul e oeste. A Unidade Sertões caracteriza-se por solos rasos sobre substrato cristalino, com elevado teor de argila e grande quantidade de fragmentos de rochas. Creutzfeldt (2006) relata que nos Planaltos Sedimentares, há predominância de solos mais profundos e permeáveis, resultando em escassez de recursos hídricos superficiais. Medeiros (2009) ressalta que essas características definem o padrão de geração do escoamento superficial da bacia, com coeficientes de escoamento maiores em áreas coincidentes com a Unidade dos Sertões e altas taxas de infiltração nos Planaltos Sedimentares.

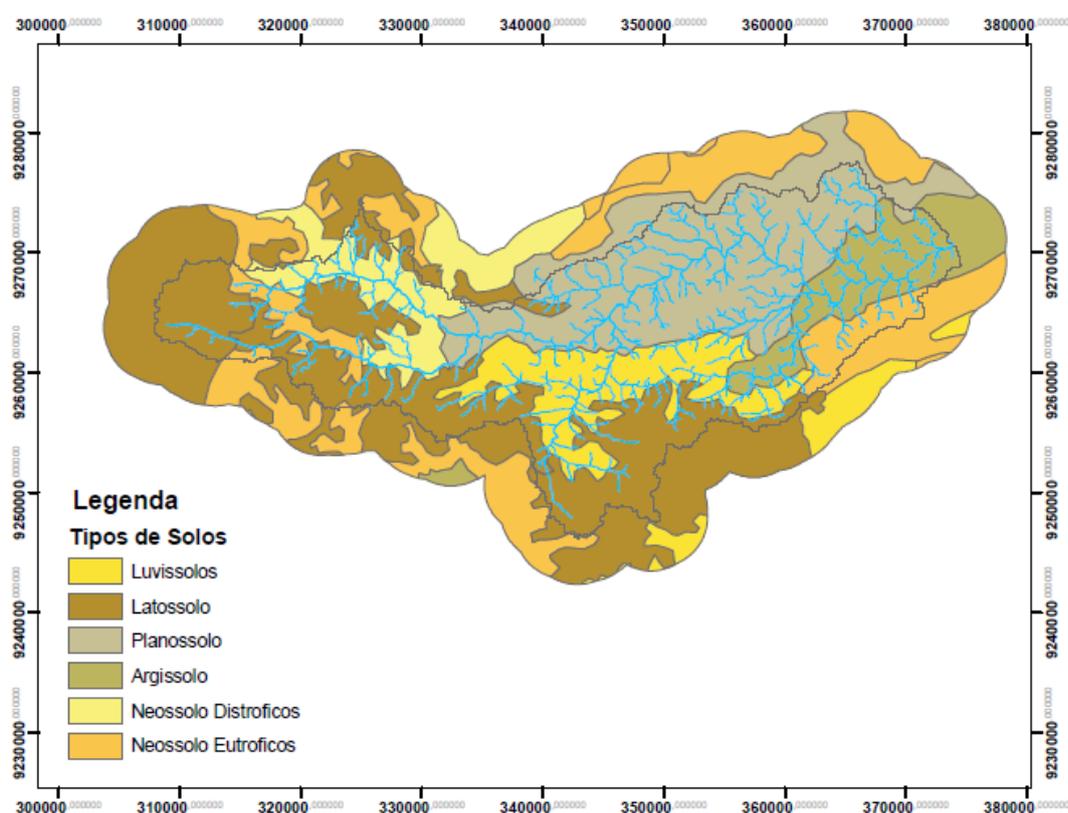
Os solos encontrados na região são (RADAMBRASIL, 1981): Bruno Não Cálcico, Latossolo Vermelho-Amarelo, Planossolo Solódico, Podzólico Vermelho-Amarelo e Litólicos. No entanto, a nomenclatura dos solos do RADAMBRASIL (1981) está desatualizada, de acordo com o novo sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2013) o Bruno Não Cálcico passou a ser Luvissole, Latossolo Vermelho-Amarelo é somente Latossolo, Planossolo Solódico é conhecido atualmente como Planossolo, Podzólico Vermelho-Amarelo passou a ser Argissolo e os Litólicos são conhecidos por Neossolos. Estes se encontram distribuídos espacialmente na bacia do Benguê conforme indicado na Figura 3. Segundo Araújo (2005), esses solos são caracterizados por:

- Luvissole (Bruno Não Cálcico): é caracterizado por solos rasos a pouco profundos, com perfis bem diferenciados mostrando sequência de horizontes A, Bt, C e mudança abrupta do horizonte A para o B. Sua ocorrência está associada à presença de pedregosidade superficial, caracterizando um pavimento desértico;
- Latossolo (Latossolo Vermelho-Amarelo): solos bem desenvolvidos, normalmente profundos, bem drenados, friáveis e porosos. Os perfis apresentam sequência de horizontes A, B, C com profundidade média de 1,5 m e transição abrupta a partir desse limite para camadas ferruginosas. Está condicionado por um relevo plano em superfície de feição tabular;
- Planossolo (Planossolo Solódico): solos relativamente rasos com drenagem imperfeita e sequência de horizonte A, Bt, C. O horizonte A é geralmente arenoso, o horizonte B apresenta uma textura altamente argilosa. Possuem más condições físicas, com aspecto maciço, sem estrutura no período chuvoso e fendilhamento em período de seca;
- Argissolo (Podzólico Vermelho-Amarelo): solos bem desenvolvidos, bem drenados, de textura argilosa, que apresentam sequência de horizontes A, B, C,

diferenciação pronunciada entre os horizontes A e B, cuja profundidade pode atingir 3,0 m. Ocupam as partes baixas e planas do relevo, ocorrendo em áreas de relevo suave ondulado a ondulado. São geralmente pedregosos ou com cobertura abundante de seixos;

- Neossolos (Litólicos): solos rasos, em geral pedregosos, de textura e fertilidade variáveis, dependendo do material de origem. Possuem perfil do tipo A sobre R, podendo ter horizontes B incipientes ou C. São encontrados em áreas de relevo suave ondulado e escarpado, geralmente associados a afloramentos rochosos.

**Figura 3** – Mapa de solos da Bacia do Açude Benguê.



Fonte: Adaptado do RADAMBRASIL, 1981.

Segundo Pinheiro (2013), o tipo vegetacional predominante na bacia do Benguê é a Caatinga, bioma caracterizado pela caducifolia e a extraordinária capacidade de regeneração de suas espécies, comportamento induzido pela condição semiárida, a fim de permitir maior eficiência ecológica para suportar a sazonalidade da umidade.

Predominantemente a área da bacia do Açude Benguê é rural, sendo a densidade populacional do município de Aiuaba, onde a bacia está localizada, da ordem de 6,6 habitantes por km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). Segundo Medeiros (2009), quanto à ocupação a bacia hidrográfica apresenta extensas áreas não exploradas e áreas de vegetação preservada, como

na Estação Ecológica de Aiuaba (ESEC de Aiuaba). Entre as atividades econômicas, destacam-se a agricultura de sequeiro, principalmente das culturas de feijão e milho, e a criação de caprinos.

Creutzfeldt (2006), por meio de imagens do satélite ASTER, classificou em doze classes o uso do solo na bacia Benguê sendo elas:

- corpo hídrico permanente - áreas identificadas com água nas imagens de satélites analisadas;
- corpo hídrico intermitente - as imagens somente identificaram a presença de água no período chuvoso, incluiu pequenos reservatórios que no período de estiagem secam;
- área urbana - foram identificados pequenos povoados na bacia sendo os distritos de Bom Nome e Barra os maiores;
- estradas não pavimentadas - todas as estradas situadas na bacia se enquadram nessa classificação;
- agricultura - resume todas as áreas de uso agrícola sem haver distinção de cultura;
- agropecuária - em resumo se trata de diferentes usos da terra, havendo transição do uso intensivo e vegetação natural, incluindo pastagens, pequenas parcelas agrícolas e terras abandonadas;
- caatinga arbórea-arbustiva conservada apresenta um tipo de vegetação decídua com uma densa mistura de árvores, arbustos, cactáceas, com galhos ramificados e espinhosos, podendo ser dividida nos estratos arbóreo (4 a 5 m), arbustivo (0,5 a 3 m) e herbáceo assumindo uma altura média de 3,8 m. Está presente em áreas com relevo plano e fortemente ondulado;
- caatinga arbórea-arbustiva degradada - fisionomia igual à classe anterior, porém com vegetação esparsa. O estrato arbóreo não é tão distinto, sendo a altura média da vegetação estimada em 2,6 m. Essa vegetação se encontra em transição entre caatinga arbórea-arbustiva conservada e as classes de agricultura e agropecuária ocorrendo em áreas de relevo ondulado;
- floresta seca - corresponde a uma vegetação densa com altura média entre 4 e 5 m. Consiste numa camada arbórea mais ou menos densa, uma camada arbustiva parcialmente impenetrável e, em alguns locais, uma camada herbácea. Ocorre em relevo fortemente ondulado com vales estreitos e vertentes íngremes;

- carrasco conservado, também denominada vegetação de tabuleiro, essa vegetação representa a transição do bioma Caatinga para o Cerrado, sendo constituído de espécies decíduas e de espécies que mantêm suas folhas durante todo o ano. É uma vegetação densa constituída de uma camada arbórea (5 a 6 m), havendo algumas árvores que atingem 10 m, com cobertura quase total e uma camada arbustiva. Ocorre principalmente nas áreas sedimentares, em vertentes íngremes e nos planaltos;
- carrasco degradado - esta classe de vegetação apresenta as mesmas características da vegetação carrasco conservado, porém modificado pela ação humana. Observam-se áreas abertas, a altura média dessa vegetação é de 3,5 a 4 m. Ocorre principalmente nos planaltos, em áreas de relevo plano e representa a transição entre áreas de uso intensivo e áreas de vegetação natural;
- carrasco em regeneração - apresenta as mesmas características da vegetação de carrasco conservado, mas não há árvores altas. Representa uma vegetação em estágio de regeneração. A camada formada por arbustos e pequenas árvores é bastante densa, possuindo uma altura média de vegetação de 3 m. Na bacia do Benguê a sua ocorrência é limitada ao planalto no lado leste.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Amostragem

A aquisição do material das fontes potenciais, passagem molhada e açude foram realizadas ao longo do ano de 2014, mas devido a pesquisa ter sido realizada em uma região semiárida, algumas adequações foram necessárias no decorrer da mesma. Os sedimentos das fontes potenciais foram coletados nas campanhas que ocorreram nos meses de maio e setembro de 2014. Para coleta do sedimento em suspensão foi instalado no mês de fevereiro de 2014 um amostrador na seção do rio principal da bacia do Benguê a montante da passagem molhada da seção Aroeira. Para a realização das análises físicas e mineralógicas, seria necessária uma quantidade mínima de 100 g de material, tendo sido estimado um tempo mínimo de exposição do amostrador de aproximadamente 44 h. Porém, o ano hidrológico de 2014 teve precipitações abaixo da média na área de estudo, com um total acumulado de 425,4 mm, sendo o escoamento insuficiente para a coleta da quantidade mínima de sedimentos requerida. Como não foi possível coletar com o auxílio do amostrador, optou-se por coletar sedimento assoreado na passagem molhada da seção Aroeira e no Açude Benguê.

#### 5.1.1 Coleta de amostras de solo em fontes potenciais de sedimentos

Baseado nos objetivos gerais dessa pesquisa foi realizado o monitoramento de amostras de solo em fontes potenciais e de sedimentos na seção de controle. As coletas das fontes em potencial contemplaram as variadas manchas de solos presentes na área estudada.

As amostras das possíveis fontes de sedimentos foram coletadas, com uso de pá de corte para a abertura de uma pequena trincheira, na camada superior do solo (0 – 5 cm) onde o processo erosivo é mais intenso. Foram contempladas as seis manchas de solo da bacia do Benguê, sendo apresentado na Tabela 1 a área ocupada por cada mancha de solo e o número de amostras coletadas.

Tabela 1 – Fonte potencial de produção de sedimentos

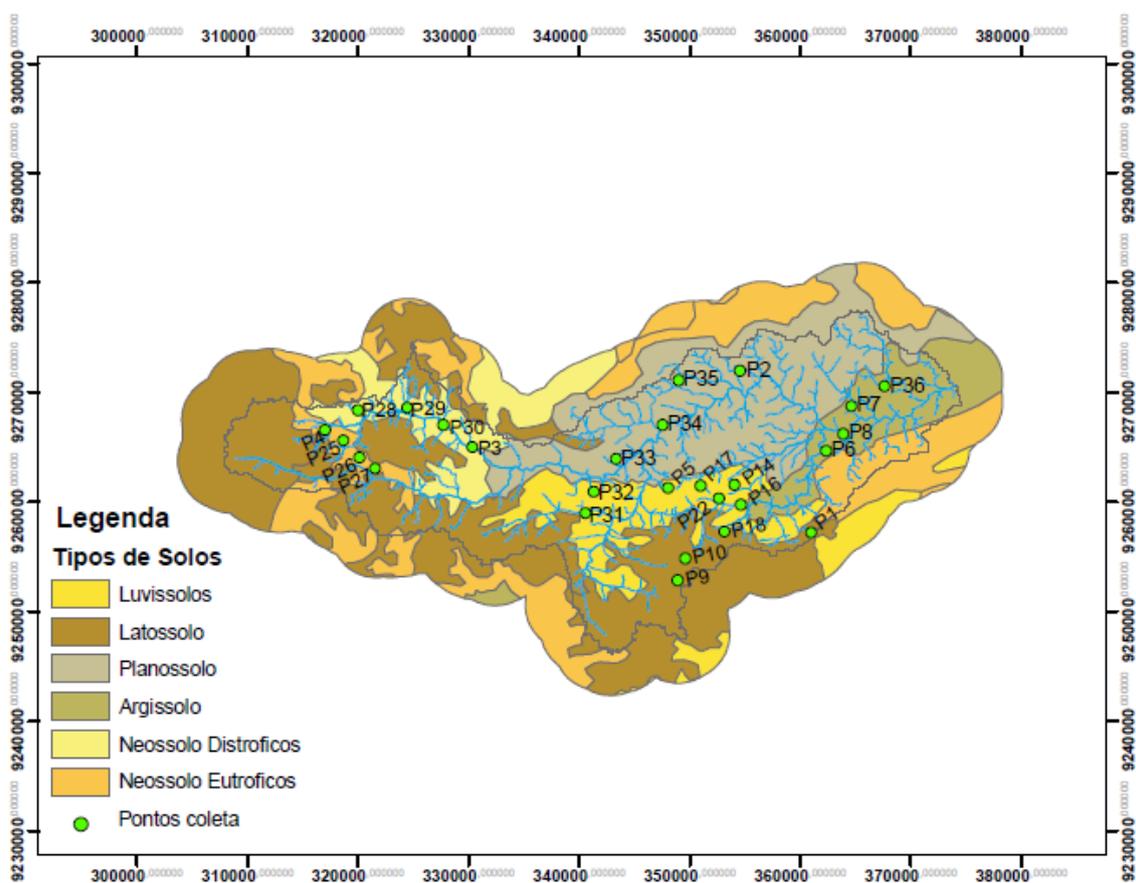
<b>Tipo de solo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Nº amostras</b>
Luvissolos	138,21	14,81	10
Latossolos	274,85	29,46	6
Planossolos	283,11	30,34	4
Argissolos	96,20	10,31	5
Neossolos Distróficos	74,07	7,94	4
Neossolos Eutróficos	66,54	7,13	4
<b>Total</b>	<b>933</b>	<b>100</b>	<b>33</b>

Fonte: AUTORA.

Como se pode observar na Tabela 1, o número de amostras variou por mancha de solo, isso ocorreu devido a restrições ao acesso aos locais de coleta. Foram realizadas campanhas ao longo do ano de 2014, sendo que as coletas das fontes potenciais foram realizadas em campanhas nos meses de maio e setembro. Na Figura 4 pode-se observar os pontos de coleta ao longo da bacia do Açude Benguê.

Para representar cada fonte foram realizadas no mínimo quatro coletas, cada amostra sendo composta por cinco sub-amostras, sendo uma central e as outras distribuídas espacialmente, em função: da abrangência, a posição na vertente, áreas homogêneas de cobertura vegetal, cor do solo e textura. A quantidade de material coletado para cada amostra foi de aproximadamente 1 kg.

**Figura 4** – Pontos de coleta na Bacia do Açude Benguê.



Fonte: Adaptado de RADAMBRASIL, 1981.

As sub-amostras foram misturadas para obtenção de uma amostra representativa da área de amostragem. As amostras foram secas ao ar e encaminhadas para as análises mineralógica e física. Os procedimentos laboratoriais de manipulação e determinação dos

elementos analisados foram realizados pelo Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará e Laboratório de Solo e Água, convênio Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e Universidade Federal do Ceará (UFC). Na Figura 5 é possível visualizar um dos pontos de coleta, este localizado na mancha Argissolo sob coordenadas UTM (Zona 24S, datum SIRGAS 2000) 9255999 N e 359124 E.

**Figura 5** – Possível fonte de sedimentos.

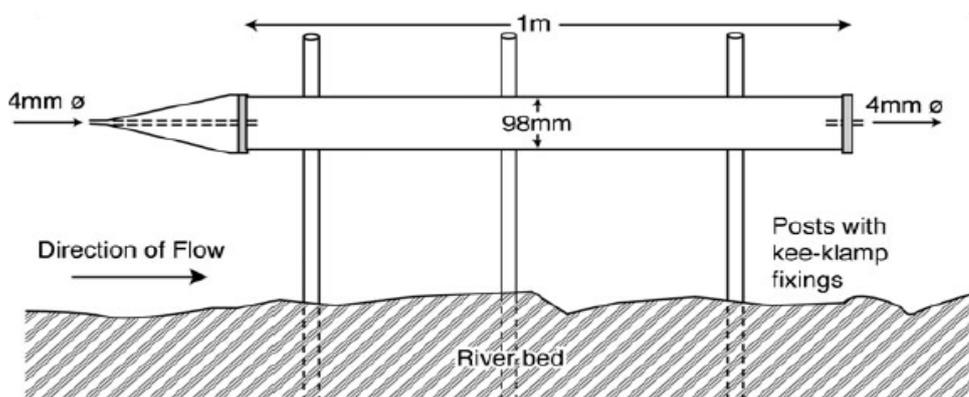


Fonte: AUTORA.

### 5.1.2 Coleta de sedimento em suspensão

A técnica de amostragem dos sedimentos em suspensão que foi utilizada para fins de identificação das fontes de sedimentos consistiu em um amostrador que acumula a longo prazo os sedimentos afluentes. Neste estudo seria necessária uma quantidade mínima de 100 g de material para determinação de todos os parâmetros físicos e mineralógicos para aplicação do método de identificação das fontes de sedimentos. O amostrador foi fixado no rio principal da bacia do Benguê, a montante da passagem molhada da seção Aroeira (Figuras 1 e 2). A Figura 6 ilustra o layout do equipamento.

**Figura 6** – Desenho esquemático do amostrador.



Fonte: PHILIPS et al., 2000.

O amostrador foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Exeter (PHILIPS et al, 2000; RUSSEL et al., 2000). A sua utilização proporciona a coleta de pequenas quantidades de sedimentos e o seu sucesso no desenvolvimento e implantação está associado à capacidade de coletar amostras durante um determinado intervalo de tempo. O instrumento é visto como um avanço essencial para a captação de sedimentos e sua posterior identificação por meio da técnica fingerprinting. Walling (2013) ressalta que os amostradores são relativamente baratos de se construir, funcionam por longos períodos, fornecem amostras integradas no tempo e apresentam praticidade na recuperação dos sedimentos armazenados. O autor salienta que os amostradores foram utilizados em inúmeras pesquisas de investigações de identificação de fontes de sedimentos, em diversas partes do mundo.

O amostrador utilizado nesta pesquisa (Figura 7) apresenta uma estrutura bem simples: o mesmo foi construído com um tubo de PVC 100 mm, 1 m de comprimento, possuindo nas extremidades dois tampões (100 mm), ambos com orifícios centrais. A localização do amostrador de acordo com o sistema de coordenadas UTM (Zona 24S, SIRGAS 2000 *datum*), é 9266443 N e 362935 E. O amostrador foi fixado em duas barras de metal e preso a elas com arame. O período de monitoramento dos sedimentos em suspensão foi de fevereiro a julho de 2014, que compreende o período com ocorrência de chuvas na região.

**Figura 7** – Amostrador instalado na seção do rio principal da bacia.



Fonte: AUTORA.

### *5.1.3 Coleta de sedimento de fundo da passagem molhada (seção Aroeira) e do reservatório Benguê*

A técnica de amostragem dos sedimentos de fundo da passagem molhada na seção Aroeira e do reservatório Benguê e margens foi semelhante à coleta das fontes potenciais de

sedimentos. Com o uso de uma enxada foi coletada a camada superior (0 – 5 cm) do sedimento de fundo, sendo que cada amostra é formada por cinco sub-amostras distribuídas espacialmente. Foram coletadas seis amostras na passagem molhada e quatro nas margens, além de quatro amostras no Açude Benguê. As sub-amostras foram misturadas para posterior retirada de uma amostra representativa da área de amostragem. A coleta de amostras de solo das margens da passagem molhada foi necessária para verificar se era possível diferenciá-las das amostras do sedimento de fundo, objetivando identificar que o material do fundo não era formado somente pelos processos erosivos que ocorreram nas margens e sim dos processos que ocorrem em toda a bacia hidrográfica.

As amostras foram secas ao ar e encaminhadas para as análises mineralógica e física. Os procedimentos laboratoriais de manipulação e determinação dos elementos analisados também foram realizados pelo Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC) e Laboratório de Solo e Água, convênio Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e Universidade Federal do Ceará (UFC).

## **5.2 Caracterização mineralógica e física das amostras**

### *5.2.1 Caracterização mineralógica*

As análises mineralógicas do material das fontes potenciais, margens e dos sedimentos assoreados na passagem molhada e no açude Benguê foram analisadas conjuntamente, no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) da UFC. Segundo Meyer e Scott (1982), as análises realizadas conjuntamente diminuem as incertezas associadas aos procedimentos laboratoriais e diminuem os custos.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um aparelho que fornece rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de amostras sólidas. O aparelho é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas. O princípio do MEV consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do

feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular (DEDAVID, 2007).

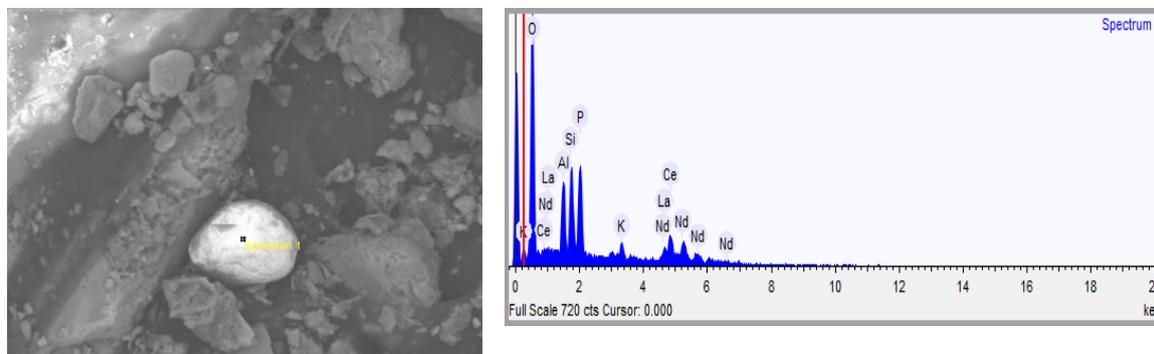
Ao MEV pode ser acoplado o espectrômetro de energia dispersiva (EDS), um acessório essencial no estudo e caracterização microscópica de materiais. O EDS é uma técnica analítica utilizada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra. A técnica baseia-se na investigação da interação de uma fonte de excitação de raio-X e uma amostra, a sua capacidade de caracterização é devida a estrutura atômica única de cada elemento, permitindo a formação de um único conjunto de picos no seu espectro de raio-X. O MEV/EDS apresenta como vantagem a sua rapidez e facilidade na preparação das amostras e também a capacidade de identificar vários elementos químicos presentes na amostra, salientando que somente é possível a identificação dos elementos químicos com massa atômica superior ao do boro (B) e que os elementos presentes na amostra estejam presentes em concentração superior a 1% (DEDAVID, 2007).

Por meio das análises mineralógicas, é possível observar a composição química dos minerais presentes nas amostras. Segundo Minella (2003), inicialmente não há evidências de quais elementos químicos apresentam capacidade discriminante entre as fontes e quais fontes podem ser utilizadas. Sendo assim, é possível analisar uma grande quantidade de variáveis: cátions básicos (Na, Ca, Mg, K), metais traçadores (Fe, Mn, Al), metais pesados (Cu e Zn), compostos orgânicos e inorgânicos (C, N, P<sub>total</sub>), óxidos de Fe e Mn, e o Al associado aos óxidos.

### *5.2.2 Etapa laboratório*

Após secagem das amostras (solo e sedimento), foi depositada uma pequena porção numa fita de carbono dupla face afixada em suporte metálico (stub). A fita de carbono é utilizada devido o solo não ser um bom condutor, portanto é necessário submetê-lo a um processo de metalização (processo de aplicação de uma camada de carbono ou ouro), haja vista que as amostras analisadas no MEV/EDS têm que ser condutoras de corrente elétrica. Outro motivo para o recobrimento das amostras, é que as camadas depositadas podem melhorar o nível de emissão de elétrons, pois emitem mais elétrons que o material da amostra, facilitando a construção da imagem (GOLDSTEIN et al., 1992). Feito isso, as amostras foram submetidas a análise no MEV/EDS, no qual os elétrons emitidos incidem sobre a amostra produzindo um espectro (Figura 8) que traz informações pertinentes à composição química da amostra.

**Figura 8** – MEV da superfície e espectro do EDS para as amostras de solo da Bacia do Benguê. Superfície da amostra (esquerda) e espectro gerado (direita).



Fonte: AUTORA, 2014.

Como se pode observar na Figura 8, a imagem à esquerda é produzida no MEV, indicando a superfície da amostra, já a imagem a direita é o espectro gerado no EDS. O espectro permite observar os elementos químicos que compõem a amostra, o eixo das abcissas do espectro corresponde a energia dos fótons (KeV) e o eixo das ordenadas a contagem do número de fótons, sendo que os picos produzidos possibilitam a quantificação dos elementos químicos presentes. Por meio dessa quantificação é possível identificar 21 elementos (Al, Ag, Ba, Ca, Ce, Cr, Fe, Ir, La, K, Mg, Mn, Na, Nd, Ni, P, S, Si, Ti, Yn e Zr) os quais foram submetidos ao Teste Kruskal-Wallis para analisar qual deles possuíam capacidade discriminante.

### 5.2.3 Caracterização física e fator de correção

Segundo Meyer e Scott (1982) existem muitas divergências com relação à metodologia de classificação granulométrica para estudo e transporte de sedimentos, principalmente naqueles transportados na forma de microagregados. Neste estudo foram utilizados os métodos padrões (peneiramento e sedimentação) para a determinação da granulometria das partículas primárias nas fontes e sedimentos de fundo.

Horowitz (1991) afirma que os fatores físicos como a granulometria, estão fortemente associados com a concentração dos elementos traços nos sedimentos, já que as partículas de granulometria mais fina (argila e silte) apresentam concentrações maiores dos elementos utilizados como traçadores. O material das fontes (solo), em geral, apresenta uma concentração maior de partículas de areia quando comparado aos sedimentos em suspensão.

Essa diferença afeta fortemente a comparação química entre os dois materiais (MINELLA et al., 2009).

Duas alternativas podem ser aplicadas para corrigir o efeito da diferença granulométrica. A primeira é estabelecer o diâmetro médio máximo das partículas dos sedimentos transportados em suspensão ou utilizar um fator de correção que analisa a concentração química da amostra proporcional à porcentagem da faixa granulométrica de interesse (WALLING; COLLINS, 2000). No desenvolvimento da pesquisa para realizar as correções das concentrações dos elementos químicos, os quais dependem da granulometria dos sedimentos em suspensão, utilizou-se a Equação 1 (HOROWITZ, 1991).

$$Z_{si} = C_o [100 / (100 - F_{ars})] \quad (1)$$

Em que  $Z_{si}$  é a concentração corrigida das fontes e do elemento original analisado (i),  $C_o$  é a concentração média original do elemento químico analisado e  $F_{ars}$  é a porcentagem da fração maior que 63  $\mu\text{m}$  das amostras das fontes.

### 5.3 Discriminação das fontes de sedimentos

#### 5.3.1 Análise individual da capacidade discriminante de cada elemento

Segundo Walling e Woodward (1995) duas características dos sedimentos erodidos são importantes para que uma propriedade geoquímica seja efetiva como um elemento traço: este deve apresentar diferenças significativas na sua concentração entre as fontes a serem identificadas; e que haja manutenção desta propriedade durante a remoção e o transporte dos materiais das fontes até a calha do rio.

A primeira etapa para identificar as fontes de sedimentos foi realizar análise dos materiais de todas as fontes, com o objetivo de estabelecer se há diferenças significativas entre as fontes e quais parâmetros possibilitarão separá-las. Para este procedimento foi utilizado um teste não paramétrico, denominado de teste-H ou Kruskal-Wallis (WALLING; COLLINS, 2000). Este permite testar uma hipótese nula em que k amostras aleatórias independentes são provenientes de uma mesma população (Equação 2).

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{s=1}^k \frac{R_s}{n_s} - 3(n+1) \quad (2)$$

em que  $R_s$  se refere à soma das posições em que cada amostra da fonte s assume quando todas as amostras são colocadas em ordem crescentes (série);  $n_1$  o número de observações da fonte s; n a soma dos  $n_1$  e k o número de fontes.

O teste Kruskal-Wallis foi aplicado para verificar a capacidade discriminante das fontes potenciais de sedimento e também verificar se o material das margens possuía elementos que o diferenciavam do sedimento de fundo da passagem molhada.

Ao se testar as diferenças para uma variável  $i$  qualquer para 3 fontes, por exemplo, tem-se 6 amostras ( $n_1 = 6$ ) coletadas para cada fonte, em que o valor de  $n$  é a soma dos  $n_1$ , que é igual a 18. Este conjunto  $n$  de dados são dispostos em ordem decrescente e associados ao primeiro valor o número 1, ao segundo o número 2, e assim por diante, formando uma série de valores compondo as amostras de todas as fontes. Para cada fonte são somados os valores das séries ( $R_s$ ), e desta forma é possível calcular o valor de  $H$ . A hipótese nula ( $H_0$ ) a ser testada admite que as populações são idênticas e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) é de que as populações se diferem. Quando o valor de  $H$  calculado exceder o valor crítico de  $H$ , com  $k-1$  graus de liberdade e grau de significância 5%, a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, a probabilidade é pequena (5% ou menos) de se observar diferenças das amostras, se as observações são provenientes da mesma população, ou seja, a variável apresenta capacidade discriminante entre as fontes (MINELLA, 2007). Os procedimentos estatísticos foram realizados com auxílio do programa estatístico, SPSS®.

Após a realização do teste Kruskal-Wallis para todas as amostras foi possível selecionar um conjunto de variáveis que possuem capacidade discriminante. Walling e Woodward (1995) salientam que o conjunto de propriedades escolhidas refletem os diferentes controles e comportamentos do processo de produção de sedimentos para maximizar o grau de discriminação fornecido pelo conjunto de variáveis.

### 5.3.2 Classificação das amostras de sedimentos coletados no exutório

Yu e Oldfield (1989) afirmam que os sedimentos em suspensão são compostos de uma mistura de vários tipos de solos provenientes de diversas fontes e que há um considerável número de elementos químicos que caracterizam as amostras, sendo assim é possível realizar uma análise multivariada que correlaciona às concentrações químicas nas fontes e nos sedimentos que chegam ao exutório da bacia.

Esta etapa da pesquisa teve como objetivo verificar a contribuição em porcentagem de cada fonte de sedimento para o sedimento assoreado na passagem molhada e do Açude Benguê. Segundo Minella et al. (2009), para analisar as contribuições de cada fonte é necessário comparar o conjunto de variáveis traçadoras identificadas nas fontes e nos sedimentos de maneira que se possa encontrar a melhor proporção de cada fonte para

reproduzir as concentrações dos elementos químicos observados nas amostras de sedimento coletado no exutório. Esta condição é atingida por meio da aplicação da análise da classificação multivariada e uma função de minimização para a solução de sistemas sobredeterminados.

Collins et. al. (1997) utilizaram a Equação 3 para descrever a relação numérica entre a composição química dos sedimentos no exutório e a composição química das fontes e as suas proporções.

$$y_i = \sum_{s=1}^n C_{si} P_s \quad (3)$$

onde  $y_i$  é a concentração do elemento químico  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ) nos sedimentos;  $C_{si}$  é a concentração do elemento químico  $i$  na fonte  $s$  ( $s = 1, 2, \dots, g$ );  $P_s$  é a proporção com que a fonte  $s$  contribui para o sedimento.

Minella (2007) argumenta que a equação pode ser vista como um sistema linear sobredeterminado, ou seja, o número de equações é maior que o número de incógnitas, sendo o número de equações definido pelo número de elementos químicos selecionados na fase de discriminação das fontes e as incógnitas são as contribuições de cada fonte para os sedimentos em suspensão que se deseja obter.

Walling e Woodward (1995) propuseram uma função objetivo que calcula os valores de contribuição de cada fonte ( $P_s$ ), pela minimização da soma dos quadrados dos resíduos (Equação 4). A função objetivo é condicionada a duas restrições:

- I. A contribuição de cada fonte deve ser um valor não negativo (Equação 5);
- II. O somatório das contribuições de todas as fontes seja igual a 1 (Equação 6).

Esse processo foi realizado em planilhas Excel<sup>®</sup> utilizando a ferramenta Solver, cujos dados foram expressos em porcentagem de contribuição relativa de cada fonte.

$$f = \sum_{i=1}^m \left\{ \left( C_i - \left( \sum_{s=1}^n P_s C_{si} Z_s \right) \right) / C_i \right\}^2 \quad (4)$$

$$0 \leq P_s \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^n P_s = 1 \quad (6)$$

onde  $C_i$  é a concentração da variável traçadora  $i$  na amostra de sedimentos em suspensão;  $P_s$  é a proporção de contribuição da fonte  $s$ ;  $C_{si}$  é o valor médio da variável traçadora  $i$  obtida na fonte  $s$ ; e  $Z_s$  é o fator de correção da granulometria para a fonte  $s$ .

Walling e Collins (2000) ressaltam que o modelo é adequado para a identificação das fontes caso o erro relativo médio (ERM) seja menor que 15%, e os resultados com o ERM maiores que 15% devem ser excluídos. Sendo o ERM a média da soma dos quadrados dos resíduos de cada variável, isto é importante visto que se pode avaliar individualmente a eficiência de cada variável dentro do modelo linear de otimização.

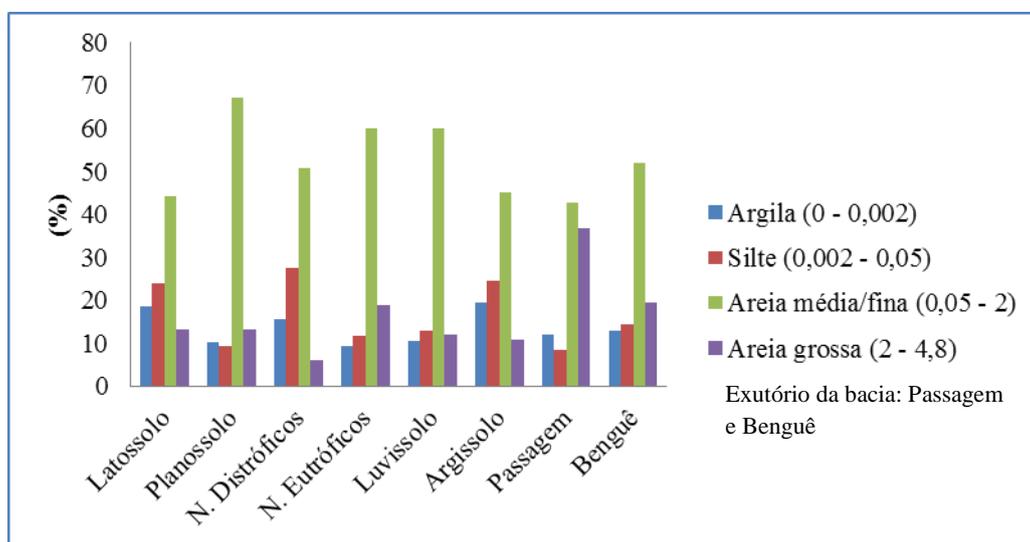
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização física das amostras

As análises granulométricas foram realizadas por meio de peneiramento e sedimentação. As análises foram feitas para que se pudesse aplicar o fator de correção ( $Z_{si}$ ), este que é utilizado para adequar a concentração química das amostras de forma proporcional à faixa granulométrica de interesse. A granulometria do solo relaciona-se diretamente com atributos importantes para a qualidade dos sedimentos (POLETO et. al., 2009) e também está fortemente associada aos elementos traços, sendo que estes se encontram em maior parte associados ao material de granulometria fina.

Neste estudo, foi considerado como material não reativo a fração maior que 63  $\mu\text{m}$ . Essa fração, segundo Horowitz (1991), seriam as partículas primárias, possibilitando assim as correções das concentrações químicas das fontes por meio dessa proporção. O Gráfico 1 nos traz informações pertinentes a granulometria das fontes potenciais de sedimentos, da passagem molhada e do Açude Benguê.

**Gráfico 1** – Análise granulométrica.



Fonte: AUTORA.

Como se pode observar no Gráfico 1, quando comparada a quantidade de argila e silte na passagem molhada e no Açude Benguê, este apresenta um teor mais relevante. Isso ocorre devido a passagem molhada verter com maior frequência levando os sedimentos finos a se depositarem no Açude Benguê. Em eventos de grande intensidade os materiais da passagem molhada são movimentados e ocorre a remobilização dos sedimentos finos para o

Açude Benguê. Esses materiais são provenientes de diversas fontes e que foram depositados em eventos anteriores.

Apesar de o Açude Benguê apresentar um maior teor de argila e silte em relação à passagem molhada, ainda não foi possível aplicar o fator de correção. Pois ele é utilizado quando o material coletado no exutório da bacia é predominantemente fino em relação à fonte. Ao observar o Gráfico 1 pode-se concluir que não há uma diferenciação notória na concentração de sedimentos finos do material coletado nas fontes e Açude Benguê, isso ocorre devido o açude reter sedimentos contemplando toda a faixa granulométrica, diferentemente dos sedimentos em suspensão, que são finos em grande parte. Então adotamos o 1 como  $Z_{si}$  (fator de correção) para todas as manchas de solo presente na bacia em estudo.

## **6.2 Caracterização mineralógica das amostras e análise da capacidade discriminante dos elementos**

Realizou-se a análise mineralógica no material coletado nas fontes potenciais, no sedimento assoreado na passagem molhada e no açude Benguê. Também foi realizada a análise mineralógica nas margens da passagem molhada para verificar a aplicabilidade de uso do sedimento assoreado na identificação das fontes de sedimentos.

### *6.2.1 Utilização do material assoreado*

Como não foi possível coletar sedimento em suspensão com o amostrador, optou-se por utilizar o material assoreado na passagem molhada e no açude Benguê para a identificação das fontes de sedimentos. Entretanto, para utilizar o material assoreado na análise, primeiramente foi verificado se o material que compõe o sedimento de fundo era proveniente das margens da passagem molhada ou das distintas fontes de sedimentos presentes na bacia do Benguê. Essa verificação foi realizada por meio de análises mineralógicas, no qual foram identificados 20 elementos (Ag, Al, Ba, C, Ce, Cr, Fe, Ir, K, La, Mg, Mn, Na, Nd, Ni, P, Si, Ti, Y e Zr) presentes nas amostras. De posse dos elementos encontrados nas amostras, aplicou-se o teste de Kruskal–Wallis, este que permite observar quais elementos apresentaram capacidade discriminante.

Na Tabela 2, pode-se observar as variáveis químicas encontradas nas amostras coletadas. Dentre os 20 elementos encontrados nas análises mineralógicas somente 8 elementos apresentaram capacidade discriminante na análise: Ag, Al, Ba, Cr, Mg, Na, Ni e Y.

De posse dos resultados pode-se concluir que é possível utilizar o sedimento de fundo da passagem molhada na identificação das fontes da bacia.

Tabela 2 – Proveniência do material assoreado

Variáveis	Valores de H	Valores limites de H	Valor p
Ag	6,54	3,84	95%
Al	2,91	2,71	90%
Ba	6,54	3,84	95%
C	0,41	6,63	99%
Ce	0,18	6,63	99%
Cr	6,54	3,84	95%
Fe	0,18	6,63	99%
Ir	2,27	6,63	99%
K	0,18	6,63	99%
La	0,04	6,63	99%
Mg	2,91	2,71	95%
Mn	0,73	6,63	99%
Na	6,54	3,84	95%
Nd	0,18	6,63	99%
Ni	6,54	3,84	95%
P	0,18	6,63	99%
Si	0,18	6,63	99%
Ti	0,18	6,63	99%
Y	2,90	2,71	90%
Zr	2,23	3,84	95%

H – valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado;  
p – probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrada;

### 6.3 Elementos discriminantes das fontes e passagem molhada

Na bacia estudada foram identificados seis tipos de solo: Latossolo, Planossolo, Neossolo Distrófico, Neossolo Eutrófico, Luvisolo e Argissolo. Estes são considerados possíveis fontes de sedimento. Na Tabela 3, pode-se observar as concentrações médias por variável nas fontes de sedimentos. Foram identificadas 22 variáveis (Ag, Al, Ba, C, Ca, Ce, Cr, Cu, Fe, Ir, K, La, Mg, Mn, Na, Nd, Ni, P, S, Si, Ti, Y e Zr) presentes nas amostras das fontes. Esses elementos identificados na bacia do Benguê são frequentemente encontrados por outros pesquisadores, Collins (2010) testou 24 variáveis químicas (Al, Ba, Bi, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ho, K, Mo, Na, Nd, Pb, Pd, Sm, Sn, Sr, Tb, Ti, Y, Yb e Zn) na sub-bacia do Rio Cary. Dessas variáveis, 8 delas (Al, Ba, Fe, K, Na, Nd, Ti e Y) foram identificadas no presente estudo. Minella (2009) identificou 11 variáveis químicas (Al, C, Ca, Co, Cr, Fe, Mn, N, Na, P e Zn) no sul do Brasil, em uma pequena sub-bacia rural de 57 ha, situada nas

cabeceiras do Arroio Lajeado Ferreira, tributário do Rio Taquari. Esta sub-bacia apresentou três tipos de solos. Das 11 variáveis identificadas por Minella (2009), 8 (Al, C, Ca, Cr, Fe, Mn, Na e P) delas estão presentes na bacia do Benguê.

Tabela 3 – Concentrações médias das variáveis químicas analisadas nas fontes.

Variáveis (%)	Fontes					
	Argissolo	Latossolo	Luvissolo	N. Distrófico	N. Eutrófico	Planossolo
Ag	Nd	0,31	nd	0,11	Nd	nd
Al	9,47	10,75	8,38	7,38	8,45	9,51
Ba	3,75	nd	nd	1,25	2,16	nd
C	0,58	1,45	4,21	Nd	0,72	nd
Ca	0,22	0,11	0,19	Nd	0,04	nd
Ce	1,50	3,09	2,30	3,04	3,40	5,99
Cr	Nd	1,00	nd	Nd	Nd	nd
Cu	Nd	nd	nd	Nd	Nd	0,7
Fe	19,48	22,36	12,86	15,00	14,91	13,44
Ir	Nd	1,08	0,65	Nd	Nd	nd
K	Nd	0,57	nd	0,46	Nd	0,92
La	1,2	1,4	0,55	1,25	1,79	3,01
Mg	0,28	0,4	nd	0,13	0,09	0,36
Mn	0,26	0,18	0,39	Nd	0,21	0,44
Na	Nd	nd	0,31	0,08	Nd	0,08
Nd	1,00	1,39	0,88	0,76	1,13	1,98
Ni	Nd	0,32	0,89	Nd	Nd	0,37
P	2,52	3,34	nd	3,06	4,20	5,54
S	1,94	nd	0,38	0,63	1,20	nd
Si	28,31	25,82	31,75	34,39	30,96	31,18
Ti	5,65	15,66	10,32	Nd	6,35	11,15
Y	Nd	0,65	0,34	Nd	nd	nd
Zr	16,80	11,26	nd	23,04	16,04	13,61

nd – não determinado

Pode-se observar na tabela acima que os elementos o Al, Ce, Fe, La, Mg, Nd e Si, apresentaram-se em todas as possíveis fontes de sedimentos, variando somente as concentrações. Já outras variáveis químicas como o Cr (cromo), verificou-se somente no latossolo e o Cu (cobre) no planossolo. O Y (Ítrio) foi identificado em dois tipos de solos da bacia do Benguê no latossolo e luvisolo. Este é um elemento químico considerado raro, identificado em rochas lunares e meteoritos.

Ao se aplicar o Teste Kruskal-Wallis, em nível de significância variando 1 a 5%, grau de liberdade 5, somente 10 variáveis foram selecionadas (C, Ca, Cr, Cu, Ir, Na, Ni, S, Y

e Zr). O procedimento estatístico, proposto por Collins et al. (1997), foi utilizado para confirmar o potencial de discriminação das fontes. A Tabela 4 apresenta os resultados do Teste de Kruskal-Wallis para a utilização da técnica fingerprinting, para discriminar as seis fontes. Segundo Collins et al. (2010) o Teste Kruskal-Wallis proporciona uma seleção de variáveis eliminando as de propriedades redundantes.

Tabela 4 – Variáveis selecionadas pelo teste de discriminação Kruskal-Wallis elementos com potencial discriminante das fontes de sedimentos

<b>Variáveis</b>	<b>Valor de H</b>	<b>Valores limites de H</b>	<b>Valor de p</b>
C	15,98	6,63	99%
Ca	12,92	3,84	95%
Cr	23,84	6,63	99%
Cu	19,78	6,63	99%
Ir	23,94	6,63	99%
Na	18,59	6,63	99%
Ni	15,08	6,63	99%
S	11,26	3,84	95%
Y	23,94	6,63	99%
Zr	12,11	3,84	95%

H – valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado;  
p – probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrada;

Na Tabela 4 encontra-se o resultado dos elementos selecionados pelo teste estatístico H (Kruskal-Wallis), mostrando o valor de H calculado para cada variável, que determinou quais elementos apresentam diferença estatística para uma probabilidade igual ou maior que 95%. Sete elementos foram selecionados utilizando um nível de significância 99% e 3 elementos foram selecionados quando o nível de significância foi reduzido para 95%.

Todas as variáveis presentes na Tabela 4 apresentaram capacidade discriminante em todos os pontos de coleta. Segundo Miguel et al. (2014), deve-se ter cuidado com elementos de maior instabilidade como o Na, por exemplo, pois este pode sofrer modificações como enriquecimento de seus teores nos sedimentos em suspensão, comprometendo assim, a análise de contribuição de cada fonte. O Cr, Cu, Ir e Ni que são classificados como metais de transição, evidenciaram capacidade discriminante entre as fontes e boa conservatividade, tendo a capacidade de manter as suas características mesmo quando removidos e transportados até a calha do rio (HOROWITZ, 1991).

O elemento químico C, presente na Tabela 4, apesar de se apresentar como um bom discriminante, não foi utilizado para identificação das fontes de sedimentos devido aos procedimentos laboratoriais de análise mineralógica. Após secagem, as amostras são fixadas no stub (suporte metálico) e para isso foi utilizada uma fita de carbono. Então ao realizar a leitura no MEV/EDS não há como distinguir a porcentagem de carbono que pertence à amostra da porcentagem de carbono presente na fita. Devido à incerteza no resultado das porcentagens de C optou-se por excluí-lo da análise. O conjunto de elementos presentes na Tabela 4 representa um número suficiente de elementos para o processo de identificação das fontes de sedimentos, além disso, são distintos em relação às suas propriedades químicas e ambientais.

#### **6.4 Identificação das fontes de sedimentos**

Como não se coletou os sedimentos suspensos por meio do amostrador, devido aos baixos índices pluviométricos na área de pesquisa houveram várias adaptações ao longo da pesquisa. Passou-se a utilizar os sedimentos assoreados na passagem molhada e no açude Benguê, para identificar a origem dos sedimentos. A análise do potencial discriminante dos elementos analisou a existência de um conjunto de variáveis capazes de discriminar as fontes Latossolo, Planossolo, Neossolo Distrófico, Neossolo Eutrófico, Luvissole e Argissolo. O modelo de identificação dos sedimentos assoreados na passagem molhada e do Açude Benguê foi aplicado para estas possibilidades. Seus resultados testaram a hipótese de que existe um número máximo de fontes possíveis de serem identificadas pelo modelo.

Para a identificação das fontes de sedimentos da bacia do Açude Benguê, por meio da técnica fingerprinting, primeiramente analisou a origem dos sedimentos da passagem molhada, não obtendo resultados conclusivos (resultado descrito no item 6.4.1). Havendo assim a necessidade de utilizar o sedimento assoreado no Açude Benguê para identificar a origem dos sedimentos da bacia estudada (resultado descrito no item 6.4.2).

##### *6.4.1 Sedimento da passagem molhada*

Para identificação das fontes de sedimentos da passagem molhada, foi estabelecida uma composição ótima (Ca, Ir, Na, Ni, S, Y e Zr), seguindo o modelo numérico (Equação 4). A Tabela 5 apresenta as contribuições relativa de cada fonte para as amostras individuais do material assoreado na passagem molhada.

Tabela 5 – Contribuição relativa das fontes para o sedimento assoreado na passagem molhada

Elem.	Erro	Med.	Estim.	Luvissole		Latossole		N. Distrófico		N. Eutró.		Planossolo		Argissolo	
				Eq. 4	Ci	PsCsiZs	Csi	Ps	Csi	Ps	Csi	Ps	Csi	Ps	Csi
Ca	0,01	0,16	0,15	0,19	0,08	0,11	0,59	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,21	0,33
S	0,21	1,23	0,67	0,38	0,08	0,00	0,59	0,63	0,00	1,18	0,00	0,00	0,00	1,94	0,33
Ir	0,28	1,45	0,69	0,59	0,08	1,08	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
Y	0,94	0,93	0,03	0,35	0,08	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
Ni	0,38	0,69	0,26	0,89	0,08	0,32	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,33
Na	0,01	0,02	0,03	0,31	0,08	0,00	0,59	0,08	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,33
Zr	0,03	10,31	12,15	0,00	0,08	11,26	0,59	23,04	0,00	16,04	0,00	13,61	0,00	16,80	0,33
<b>ERM</b>	<b>1,85</b>														

Fonte: AUTORA.

O erro relativo médio (ERM) encontrado foi de 1,85%, sendo o modelo adequado para a identificação das fontes. Em relação as contribuições médias estimadas para cada fonte analisada, observa-se a que mais contribuiu na formação do sedimento assoreado na passagem molhada foi o Latossolo (58,9%), seguida pelo Argissolo que contribui com 32,8% e o Luvissole com somente 8,31%, esta foi a que contribuiu em menor porcentagem na formação do sedimento assoreado. O Neossolo Distrófico, Neossolo Eutrófico e Planossolo não foram identificados no sedimento.

Os resultados indicaram que os sedimentos das fontes de solos próximas a passagem molhada estão ficando retidos, enquanto os sedimentos provenientes das fontes mais distantes como, por exemplo, o neossolo distrófico e eutrófico, não foram identificados no sedimento de fundo da passagem molhada. Isto ocorre devido os sedimentos finos vindo de locais distantes da bacia não ficam retidos na passagem molhada, depositando-se no açude, pois o mesmo verte com baixa frequência. E o que possivelmente ocorre com os sedimentos grosseiros desses locais é que eles ficam retidos, por exemplo, nos reservatórios ao longo do percurso, não sendo encontrados na passagem molhada.

No Gráfico 1, observa-se que o sedimento assoreado na passagem molhada apresenta uma alta porcentagem de sedimentos grosseiros. Este fato levou à coleta do sedimento assoreado no Açude Benguê (exutório da bacia) para verificar se no açude havia um maior teor de sedimento fino retido. Pois os resultados da passagem molhada apresentaram-se inconsistentes (indicando fontes muito diferentes de MEDEIROS, 2009). As contribuições na formação do sedimento da passagem molhada observadas utilizando a técnica fingerprinting, foram diferentes dos resultados estimados por Medeiros (2009), que utilizou o modelo hidrossedimentológico WASA-SED. Este estimou que a porção Oeste e Sul

da bacia do Benguê foram as que menos contribuíram para produção de sedimentos, sendo que a técnica fingerprinting indicou que a porção Sul, cujo tipo de solo predominante é o Latossolo foi a que mais contribuiu para a formação do sedimento de fundo da passagem molhada.

#### 6.4.2 Sedimento do açude Benguê

Para a identificação das fontes de sedimentos do material assoreado no açude Benguê, foi estabelecida uma composição ótima (Ca, Cr, Cu, S, Ir, Y, Na, Ni e Zr), o modelo numérico (Equação 3) foi utilizado para estabelecer a contribuição relativa de cada fonte para as amostras individuais de sedimentos assoreado no Açude Benguê. Tendo estabelecido a composição ótima das fontes potenciais de sedimentos pode-se observar na Tabela 6, as contribuições de cada fonte na composição do sedimento assoreado no açude Benguê.

Tabela 6 - Contribuição relativa das fontes para o sedimento assoreado no açude Benguê

Elem.	Erro Eq. 3	Med. Ci	Estim. PsCsiZs	Luviss.		Latos.		N. Distró.		N. Eutró.		Planos.		Argis.	
				Csi	Ps	Csi	Ps	Csi	Ps	Csi	Ps	Csi	Ps	Csi	Ps
Ca	0,25	0,09	0,14	0,19	0,03	0,11	0,00	0,00	0,16	0,16	0,17	0,00	0,14	0,21	0,50
Cr	1,00	0,00	0,00	0,00	0,03	1,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,17	0,00	0,14	0,00	0,50
Cu	0,91	1,99	0,09	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,17	0,70	0,14	0,00	0,50
S	3,21	0,46	1,28	0,38	0,03	0,00	0,00	0,63	0,16	1,18	0,17	0,00	0,14	1,94	0,50
Ir	325,45	0,00	0,02	0,59	0,03	1,08	0,00	0,00	0,16	0,00	0,17	0,00	0,14	0,00	0,50
Y	103,35	0,00	0,01	0,35	0,03	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,17	0,00	0,14	0,00	0,50
Ni	6050,23	0,00	0,08	0,89	0,03	0,32	0,00	0,00	0,16	0,00	0,17	0,37	0,14	0,00	0,50
Na	1169,30	0,00	0,04	0,31	0,03	0,00	0,00	0,08	0,16	0,00	0,17	0,09	0,14	0,00	0,50
Zr	4,12	5,52	16,73	0,00	0,03	11,26	0,00	23,04	0,16	16,04	0,17	13,61	0,14	16,80	0,50
<b>Soma</b>	<b>7657,82</b>														

Fonte: AUTORA.

Os resultados da classificação das fontes de sedimentos de fundo do Açude Benguê, considerando-se as seis fontes potenciais foram satisfatórias. O erro relativo médio (ERM) estimado foi superior a 15%, o alto valor encontrado demonstra que o Excel-Solver foi incapaz de encontrar uma solução adequada. As contribuições médias estimadas pelo modelo foram: 50% para o Argissolo, 17% para o Neossolo Eutrófico, 16% para o Neossolo Distrófico, 14% para o Planossolo, 3% para o Luvissolo, não sendo identificadas contribuições do Latossolo.

Pode-se observar na Tabela 6, que a fonte Argissolo foi a que mais contribui para a formação do sedimento de fundo do Açude Benguê, justifica-se o fato, pela proximidade da

mancha de solo ao açude, assim devido aos processos erosivos que ocorrem na bacia, há o carreamento de uma maior quantidade de sedimentos para o açude.

As fontes Argissolo, Neossolo Eutrófico, Neossolo Distrófico, Planossolo e Luvisolo, foram as que mais contribuíram para a formação do sedimento de fundo do açude Benguê. Estes resultados qualitativos se aproximaram dos resultados obtidos por Medeiros (2009), através do modelo WASA-SED, ou seja, as principais fontes de sedimentos identificadas no presente estudo, coincidiram com os locais de maior contribuição de Medeiros (2009).

## 7 CONCLUSÕES

A partir do monitoramento, organização e análise dos dados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir:

- (i) A utilização da técnica fingerprinting mostrou-se tratar de uma ferramenta adequada para identificação das fontes de produção de sedimentos na bacia analisada;
- (ii) O presente estudo indicou que pelas propriedades traçadoras (físicas e mineralógicas) naturais dos sedimentos depositados na passagem molhada e no Açude Benguê que é possível identificar as fontes de sedimentos. Das possíveis fontes de sedimentos da bacia do Benguê (Latossolo, Planossolo, Neossolo Distrófico, Neossolo Eutrófico, Luvissole e Argissolo), conclui-se que nesta pesquisa as que mais contribuíram para formação do sedimento assoreado no exutório foram o Argissolo que são solos bem desenvolvidos e drenados, a sua textura é argilosa e ocupam as partes baixas e planas do relevo. Os Neossolos Eutrófico e o Distrófico são rasos, pedregosos, a textura e fertilidade variáveis, são encontrados em áreas de relevo ondulado e escarpado. O Planossolo é um solo relativamente raso com drenagem imperfeita, geralmente arenoso, possuem más condições físicas, com aspecto maciço, sem estrutura no período chuvoso e fendilhamento em período de seca. E o Luvissole é caracterizado por solos rasos a pouco profundos, sua ocorrência está associada à presença de pedregosidade superficial, caracterizando um pavimento desértico. O latossolo, que não apresentou contribuição para o sedimento do Benguê, é um solo profundo e muito permeável, com baixo coeficiente de escoamento. Portanto, o fato de ele não ter contribuído é compatível com o comportamento hifrológico do mesmo;
- (iii) O resultado da aplicação da técnica fingerprinting no material assoreado na passagem molhada e no açude, encontrado por esta pesquisa, permitiu explicar as condições de transporte de sedimentos na bacia estudada;
- (iv) A identificação das fontes de sedimentos por meio da técnica fingerprinting é realizada comparando propriedades do sedimento das possíveis fontes com o sedimento em suspensão coletado no exutório da bacia. Nesta pesquisa foi realizada uma adequação na técnica como não foi possível coletar sedimento

em suspensão, optou-se por utilizar sedimento assoreado no exutório da bacia. Na pesquisa se concluiu que é possível utilizar o material assoreado na identificação das fontes de sedimentos, conclusão de elevada relevância para o semiárido brasileiro, este que apresenta uma elevada concentração de açudes;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLANTINE, D. J.; WALLING, D. E.; COLLINS, A. L.; LEEKS, G. J. L. The content and storage of phosphorus in fine-grained channel bed sediment contrasting low land agricultural catchments in the UK. **Geoderma**, v. 151, p. 141-149, 2009.

BIRD, G.; BREWER, P. A.; MACKLIN, M. G.; NIKOLOVA, M.; KOTSEV, T.; MOLLOV, M.; SWAIN, C. Quantifying sediment-associated metal dispersal using Pb isotopes: application of binary and multivariate mixing models at the catchment-scale. **Environ**, v. 158, p. 2158-2169, 2010.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico, 2010**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 02 de fevereiro. 2015.

BROSINSKY, A.; FORESTER, S.; SELG, K.; LÓPEZ-TARAZÓN, J. A.; PIQUÉ, G. A spectral fingerprinting: characterizing suspended sediment sources by the use of VNIR-SWIR spectral information. **Journal of Soils and Sediment**, v. 14, p. 1965-1981, 2014.

BUNTE, K.; MACDONALD, L. H. Scale considerations and the detectability of sedimentary cumulative watershed effects. **Research Triangle Park**, 1999.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática. 2. ed.** Revisão atualizada e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

COLLINS, A. L. **The use of composite fingerprinting for tracing the source of suspended sediment in river basin**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de Exeter, 1995.

COLLINS, A. L.; WALLING, D. E.; LEEKS, G. J. L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. **Catena**, v. 29, p. 1-27, 1997.

COLLINS, A. L.; WALLING, D. E. Selecting fingerprinting properties for discriminating potential suspended source in river basin. **Journal of Hydrology**, v. 261, p. 218-244, 2002.

COLLINS, A. L.; WALLING, D. E.; KING, P. Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information. **Geoderma**, v.155, p. 249-261, 2010.

COLEMAN, D. J.; SCATENA, F. N. Identification and evaluation of sediment sources. In: **Drainage Basin Sediment Delivery**. IAHS, v. 159, p. 3-18, 1986.

CREUTZFELDT, B. N. A. **Remote sensing based characterisation of land cover and terrain properties for hydrological modelling in the semi-arid Northeast of Brazil**. Dissertação (Mestrado em Geoecologia), Universidade de Potsdam, Alemanha, 2006.

de ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; KROL, M.; ABREU, C. B. R.; HAUSCHILD, M.; MEDIONDO, E. M. Water scarcity under scenario for global climate change and regional development in semiarid Northeastern Brazil. **Water International**, v. 29, p. 209-220, 2004.

de ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A. Influence of reservoir sedimentation on water yield in the semiarid region of Brazil. **VII IAHS Scientific Assembly**, 2005, Foz do Iguaçu. Sediment Budgets, IAHS Publication 292. Wallingford: v. 2, p. 301-307.

de ARAÚJO, J. C.; KNIGHT, D. W. A review of the measurement of sediment yield in different scale. **Revista da Escola de Minas**, v. 58, p. 257-266, 2005.

de BOER, D. H.; CROSBY, G. Evaluating the potencial of SEM/EDS analysis for fingerprinting suspended sediment derived from two contrasting topsoil. **Catena**, v. 24, p. 243-258, 1995.

de VENTE, J.; POESEN, J.; VERSTRATEN, G.; ROMPAEY, A. V.; GOVERS G. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. **Global and Planetary Change**, v. 71, p.95-125, 2008

DEDAVID, B. A. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DUARTE, L. C.; JUCHEM, P. L.; PULTZ, G. M.; BRUM, T. M. M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. Aplicação de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplo brasileiro. **Pesquisa em Geociência**, v. 30, p. 3-15, 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

GELLIS, A. C.; MUKUNDAN R. Water sediment source identification: tolls, approaches, and case studies. **Journal of Soils Sediments**, v. 251, p. 1655-1657, 2013.

GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D. E.; ECHIL, P.; JOY, D. C.; ROMING, A. D.; LYMAN, C. E.; FIORI, C.; LIFSHIN, E. **Scannig eléctron microscopy and X-ray microanalysis**. New York: Plenum Press, 1992.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, A. S. S. (Org.). Erosão e conservação dos solos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

GUZMAN, G.; QUINTON, J. N.; NEARING, M. A.; MABIT L.; GÓMEZ J. A. Sediment traces in water erosion studies: current approaches and challenges. **Journal of Soils Sediments**, v. 13, p. 816-833, 2013.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Elsevier, 2003.

HOROWITZ, A. J. **A primer on sediment trace element chemistry**. Chelsea: Lewis Publishers. 1991.

MATA, J. F.; SILVA, R. R.; FONTES, M. P. F.; ERASMO, E. A. L.; FARIAS, V. L. S. Análise mineralógica, granulométrica e química, em solos de ecótonos do sudoeste do Tocantins. **Revista Brasileira Aplicada nas Ciências Agrárias**. v. 4, p. 152-175, 2011.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MEDEIROS, P.H.A.; de ARAÚJO, J.C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1216-1223, 2014.

MEDEIROS, P. H. A.; GUNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G.; de ARAÚJO, J. C. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, p. 636-648, 2010.

MEGNOUNIF, A.; TERFOUUS, A.; GHENAIM, A. & POULET, J.B. Key processes influencing erosion and sediment transport in semi-arid mediterranean área: the Upper Tafna catchment, Algerian. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 1271-1284, 2007.

MERRITT, W. S.; LATCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, p. 761-799, 2003.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Integração dos enfoques do processo de erosão hídrica. **Anais da Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água**, 14. 2002.

MEYER, L. D.; SCOTT, S. H. Possible errors during evaluations of sediment size distributions. **Transactions of the ASAE**, v. 23, p. 1472-1475, 1982.

MINELLA, J. P. G. **Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2003.

MINELLA, J. P. G. MERTEN, G. H. Impact on sediment yield due to the intensification of tobacco production in a catchment in Southern Brazil. **Ciência Rural**, v. 36, p. 669 – 672, 2006.

MINELLA, J. P. G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN G. H.; CLARKE, R. T. Método “fingerprinting” para a identificação de fontes de sedimentos em bacia hidrográfica rural. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 633-638, 2009.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, v. 41. p. 424-432, 2011.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MOURA-BUENO, J. M.; TIECHER, T. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v. 38, p. 585-598, 2014.

PEART, M. R. Fingerprinting suspended sediment sources: an example from Hong Kong. In. FOSTER, I; GURNELL, A.; WEBB, B. **Sediment and water quality in river catchments**. Chichester: Wiley, 2005.

PHILIPS, J. M.; RUSSEL M. A.; WALLING, D. E.; Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. **Hydrological Process**, v. 14, p. 2589-2602 2000.

PINHEIRO, E. A. R., **Produção de sedimentos em diferentes escalas espaciais: o caso da bacia do Rio Jaguaribe – CE.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza, 2013.

POLETO, C.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. The identification of sediment sources in a small urban watershed in southern Brazil: an application of sediment fingerprinting. **Environmental Technology**. v.30, p. 1145-1153, set. 2009.

RADAMBRASIL. Folha SB 24/25 Jaguaribe/ Natal; mapa de solos. Levantamento de recursos naturais, vol. 23. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 1981.

RESTREPO, J. D.; KJERFVE, B.; HERMELIN, M.; RESTREPO, J. C. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: The Magdalena River, Colombia. **Journal of Hydrology**, v. 316, p. 213-232, 2006.

REMUS, M. V. D.; SOUZA, R. S.; CUPERTINO, J. A.; de ROS, L. F.; DANI, N.; VIGNOLLELARGE, M. L.; Proveniência sedimentar: método e técnicas analíticas aplicadas. **Revista Brasileira de Geociência**, v. 38, p. 166-168, 2008.

RUSSELL, M. A.; WALLING, D.E., HODGKINSON, R. Appraisal of a simple sampling device for collecting time-integrated fluvial suspended sediment samples. In: Stone, M. (Ed). **The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer**. IAHS, 2000.

SANTOS, L. J. C.; BARRIER, J.; GRIMALDI, M.; CASTRO, S. S. Utilização de microscópio eletrônico de varredura (MEV) para reconhecimento de revestimentos argilosos. **Boletim Paranaense de Geociência**, n.53, p. 35-43, 2003.

SIMÕES, S. J. C.; COIADO, E. M. **Métodos de estimativas da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas**. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Org. por PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Porto Alegre: ABRH, 2001.

SOUZA, C. F.; DORNELLE, A. M.; ACIOLE, L. A.; MERTEN, G. **Comparação dentre estimativas de produção de sedimentos na bacia do rio Potiribu**. Anais do VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Porto Alegre, 2006.

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. Variability of dry sediment bulk density between and within retention ponds and its impact on calculation of sediment yields. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 26, p. 375-394, 2001.

WALLING, D. E. Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In: BOARDMAN, J.; FOSTER, I. D. L.; DEARING, J. A. (Ed). **Soil erosion on agricultural land**. Chichester: John Wiley, 1990.

WALLING, D. E.; WOODWARD, J. C.; NICHOLAS, A. P. A multi-parameter approach to fingerprinting suspended-sediment sources. In: PETERS, N. E.; HOEHN, E.; LEIBUNDGUT, C.; TASE, N.; WALLING, D. E. **Traces in hydrology**. Wallingford: IAHS, 1993.

WALLING, D. E.; WOODWARD, J. C. Tracing sources of suspended sediment river basins: a case study of the River Culm, Devon, UK. **Marine Freshwater Resources**, v. 46, p. 327-336, 1995.

WALLING, D. E.; COLLINS A. L. **Integrated assessment of catchment sediment budgets: a technical manual**. Exeter: Department for International Development. 2000.

WALLING, D. E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. **Journal of Soil Sediments**, v. 13, p. 1658-1675, 2013.

WOLMAN, M. G. Changing needs and opportunities in the sediment field. **Water Resources Research**, v. 13, p. 50-54, 1977.

WRIGHT, J. F.; BERRIER, A. D. Ecological effects of groundwater pumping and a natural drought on the upper reaches of a chalk stream. **Regulated Rivers: Research and Management**, v.1, p. 145-160, 1987.

YU, L.; OLDFIELD, F. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements. **Quaternary Research**, v. 32, p. 168-181, 1989.