

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS TUFAS DA FORMAÇÃO SERRA
DA BODOQUENA (MATO GROSSO DO SUL)**

Natalia de Andrade Santiago

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Boggiani

Co-orientador: Dr. William Sallun Filho

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2015 / 43)

SÃO PAULO

2015

TF
S235
NA.c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS TUFAS DA FORMAÇÃO SERRA
DA BODOQUENA (MATO GROSSO DO SUL)

Natalia de Andrade Santiago

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Boggiani
Co-orientador: Dr. William Sallun Filho

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2015 / 43)

IGc-Instituto de Geociências



Classificação e distribuição das tufas da Formação Serra
da Bodoquena (Mato Grosso do Sul).

M26526

SÃO PAULO
2015

TF
S233
WA.C



GOVERNADO DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS TUBAS DA FORMAÇÃO SERRA
DA BODOQUENA (MATO GROSSO DO SUL)

Trabalho de Análise Geológica

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Borges
Co-orientador: Dr. Wilson Sampaio Filho

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2015-1-23)

SÃO PAULO
2015

Natalia Santiago

Natalia de Andrade Santiago

Paulo César Boggiani

Prof. Dr. Paulo César Boggiani

De acordo:

[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.]

*“...But I'm just a soul whose intentions are good:
Oh, Lord! Please don't let me be misunderstood...”*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem confiado na minha escolha de graduação.

Ao meu irmão por ter me apoiado sempre que necessário, sem questionamentos.

Ao meu orientador Paulo César Boggiani e meu co-orientador William Sallun Filho por me darem a oportunidade de realizar a monografia sob circunstâncias especiais na qual estava envolvida e me auxiliarem da melhor forma possível.

Ao meu amigo Arthur Endlein Correia sempre me ajudando em todos os passos da elaboração desse trabalho, de todas as formas possíveis e em todos os momentos, principalmente os de crise.

Ao meu querido Rafael de Araújo Campanhã por sempre estar ao meu lado, em todos os momentos da minha vida, por me apoiar em tudo, sempre incentivando a me superar como pessoa, enfrentar os obstáculos de cabeça erguida. Você é a pessoa mais especial que já apareceu na minha vida.

Ao prof. Dr. Gergely Andres Julio Szabó, presidente da comissão do trabalho de formatura por estar sempre disponível para seus alunos e pela compreensão em relação à realização de meu intercâmbio internacional.

À FAPESP via auxílio à pesquisa (proc. nº 14/14433-9) coordenado por William Sallun Filho.

RESUMO

A Serra da Bodoquena, localizada no sudoeste do Mato Grosso do Sul, é um planalto de rochas carbonáticas (grupo Corumbá - Ediacarano) com escarpas voltadas para oeste, em direção às planícies da bacia do Pantanal. Esta região é conhecida por ter uma das maiores concentrações de tufa no continente sul-americano (Formação Serra da Bodoquena). A presença de diferentes tipos de tufa ativa permite o estudo de processos genéticos e seus condicionantes geológicos e geomorfológicos. A importância do estudo das tufas tem crescido, principalmente devido a serem possíveis análogos modernos para os reservatórios de hidrocarbonetos conhecidos como "pré-sal" das bacias costeiras do Atlântico Sul. Eles também são importantes para estudos paleoclimáticos e como as principais atrações turísticas das regiões de Bonito e Bodoquena, por suas paisagens cênicas, juntamente com rios de águas claras. Este trabalho consiste em um mapa construído a partir de compilação de dados, com localização e distribuição dos principais tipos de tufa ativos e inativos, com o auxílio de processamento digital de imagem de satélites, tornando possível identificar os principais fatores de formação destes carbonatos continentais. Na Serra da Bodoquena encontram-se três tipos principais: 1) tufas micríticas; 2) cachoeiras de tufas e 3) barragens de tufas. As tufas micríticas estão presentes nas cabeceiras dos principais rios, como o rio Perdido e rio Formoso, e estariam associadas a possíveis barramentos pretéritos. A concentração de cachoeiras de tufas ocorrem ao longo de rios com maior desnível e em relevo mais acidentado, como é o caso do rio Mimoso, o qual corta metassedimentos (diamictitos) da Formação Puga. As tufas na forma de barragens ocorrem ao longo de rios que cortam o maciço calcário, como o rio Perdido, no interior do Parque Nacional da Serra da Bodoquena e o rio Formoso. Há cachoeiras isoladas, e relativamente maiores que as demais, como a do Aquidaban e a cachoeira da Boca da Onça. A formação das tufas micrítica encontra-se associadas a proliferação de cianobactérias e algas caráceas, enquanto que as barragens e cachoeiras de tufas apresentam crescimento combinado ao desenvolvimento de musgos e cianobactérias. Esta sistematização é útil para trabalhos futuros, auxiliando futuras pesquisas, como a determinação de idades e interpretações paleoclimáticas.

Palavras-chave: tufa, carbonato, Bodoquena, SIG, sensoriamento remoto

ABSTRACT

The Serra da Bodoquena, located at southwest of Mato Grosso do Sul state, is a plateau of carbonatic rocks (Corumbá Group - Ediacaran) with escarpment due west, to the plains of the Pantanal basin. This range is known to have one of the largest concentration of tufa in the South American continent (Serra da Bodoquena Formation). The presence of different types of active tufa allows the study of genetic processes and their geological and geomorphological conditions. The importance of tufa study has been growing, mainly due to being possible modern analogues of hydrocarbon reservoirs known as "pre-salt" deposits of South Atlantic coastal basins. They are also important for paleoclimatic studies and as the main tourist attractions of the Bonito and Bodoquena region, for its scenic landscapes along with rivers of clear water. This work consists in a map built from data compilation, with location and distribution of the main types of active and inactive tufa, with the aid of digital processing of digital images, making it possible to identify the main formation factors of these continental carbonates. There are three main types of tufas in Serra da Bodoquena are: 1) micritic tufa, 2) tufa cascades and 3) tufa barrages. The micritic tufa are present in the headwaters of major rivers such as the Perdido and Formoso rivers; which could be related to possible ancient barrages. Tufa cascades concentrates along rivers in higher slopes and rougher terrains, such as Mimoso river, which cuts metasediments (diamictites) Puga Formation. Tufa barrages occur along rivers that cut through the limestone massif, as Perdido river, within the Serra da Bodoquena National Park, and the Formoso river. There are relatively larger isolated cascades, like Aquidaban and Boca da Onça cascades. The formation of micritic tufa is associated with proliferation of algae and cyanobacteria characeas, while barrages and tufa cascades have their genesis dependent of the development of mosses and cyanobacteria. This systematization is useful for future work, aiding in further research, as in determining ages and paleoclimatic interpretations.

Key words: *tufa, carbonate, Bodoquena, GIS, remote sensing.*

Sumário

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. EVOLUÇÃO DOS CONHECIMENTOS	2
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
4.1. Classificação de tufas de Pedley (1990) e Ford & Pedley (1996).....	4
4.2. Sensoriamento Remoto	6
5. RESULTADOS	7
5.1. Tufas micríticas.....	8
5.2. Cachoeiras de tufas.....	9
5.3. Barragem de tufas	13
5.4. Sensoriamento remoto	17
6. DISCUSSÃO	18
7. CONCLUSÕES	19
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
9. ANEXO - MAPA DA DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE TUFAS NA SERRA DA BODOQUENA (MS).....	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de nucleações com a precipitação de calcita em tufa micrítica na Serra da Bodoquena.	9
Figura 2 - Detalhe para o musgo essencial para a Formação das tufas do tipo cachoeira e barragem.	10
Figura 3 - Cachoeira do Taíka.....	12
Figura 4 - Cachoeira do Aquidaban, na borda oeste do Planalto da Bodoquena.....	12
Figura 5 - Barragens de tufas ao longo do Rio Perdido, no interior do Parque Nacional da Serra da Bodoquena.	13
Figura 6 - Detalhe das barragens de tufa ao longo do Rio Perdido	14
Figura 7 - Depósitos do rio Formoso: A - mapa geológico da Formação Serra da Bodoquena e seu embasamento (simplificado); B - imagem de detalhe da planície do rio Formoso (drenagem atual à direita) com depósitos antigos de tufa da Formação Serra da Bodoquena (imagem Google Earth™ serviço de mapa) mostrando sequência de represas justapostas. (modificado de Sallun filho et al. 2009)	15
Figura 8 - Detalhe das barragens de tufa com paredes paralelas, na cabeceira do Rio Formoso.....	15
Figura 9 - Barragens paralelas de tufa inativa da cabeceira do Rio Formoso.....	16
Figura 10 - Parede interna da barragem de tufa, demonstrando o aprisionamento da água e faixa de crescimentos.....	16
Figura 11 - Imagens da parte interna entre as duas paredes, por onde escorria a água represada nas paredes laterais.....	17
Figura 12 - Detalhe para a diferença de textura do corpo de tufas micríticas (contorno em azul, aproximadamente 20 km de comprimento) comparado aos arredores.	18

1. INTRODUÇÃO

A maior concentração de tufas ativas do continente sul-americano ocorre na Serra da Bodoquena (Mato Grosso do Sul) e é um dos maiores e mais belos conjuntos de tufas calcárias existentes ao redor do mundo.

A Serra da Bodoquena possui destaque geológico e turístico no sudoeste do Estado do Mato Grosso do Sul, devido a seus atrativos naturais como as águas de extrema limpidez e transparência, com seus inúmeros depósitos de tufas calcárias que compõe paisagens de extrema beleza como cachoeiras e barragens naturais, além de dezenas de cavernas inseridas nesse contexto cárstico.

Esses depósitos carbonáticos continentais têm importância para estudos paleoambientais e são considerados análogos modernos dos depósitos carbonáticos do pré-sal das bacias costeiras (Wright, 2012), além de constituírem o principal atrativo turístico da região.

Dentre os estudos ali desenvolvidos, não existe uma apresentação cartográfica adequada que demonstre a distribuição dos diferentes tipos de tufas, entre eles, cachoeiras, barragens e depósitos pulverulentos (tufa micrítica), estes de interesse econômico como fonte de carbonato de cálcio.

Nesse sentido, foi elaborado mapa da distribuição das tufas com representação dos principais tipos encontrados e sistematização das informações disponíveis através de trabalhos de campo anteriores. Por meio deste mapa e da sistematização realizada, foi possível determinar e apresentar os condicionantes geológicos e geomorfológicos dos diferentes tipos de tufas da Serra da Bodoquena, o que contribuirá para futuros trabalhos de determinação de idade e investigações paleoclimáticas.

Diante das ameaças de preservação das tufas, estando estas em processo de formação, condicionadas à manutenção da qualidade das águas dos rios, o presente mapa servirá também para ordenamento territorial, uma vez que o aumento do uso da área, principalmente pela agricultura, é uma ameaça para esses depósitos carbonáticos.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho de formatura tem como objetivo principal a identificação e descrição dos diferentes tipos de tufas ativas e inativas que ocorrem na Serra da Bodoquena, estado de Mato Grosso do Sul com interpretação dos seus condicionantes geológicos e geomorfológicos. Para isso, foi realizada uma sistematização das informações disponíveis sobre as tufas e organização dessas informações e delimitação da distribuição das tufas em imagem de satélite devidamente processada para esse fim.

3. EVOLUÇÃO DOS CONHECIMENTOS

As tufas da Serra da Bodoquena foram descritas por Almeida em 1943, no qual ele definiu a Formação Xaraiés. Esta é a primeira referência de ocorrência de tufas no estado do Mato Grosso do Sul. Nela, Almeida descreveu a Formação Xaraiés como calcários encontrados na escarpa de Corumbá, formados por conglomerados com cimentos calcários na base, recobertos por calcários concrecionados e, mais superficialmente, aparecem fósseis de moluscos e vegetais numa matriz porosa, caracterizando a tufa.

Em 1945, Almeida detalhou melhor essa Formação e suas tufas. Segundo Almeida (1945), dificilmente encontra-se estrutura sedimentar na Formação Xaraiés, com predominância de calcários maciços. As rochas desta unidade são relativamente consistentes e de porosidade muito variável. Esta Formação foi dividida em quatro subunidades principais: tufa com vegetais fósseis, tufa leve e muito esponjosa, travertino com gastrópodes e conglomerado com cimento calcário, além de tipos intermediários entre elas. Por meio de fósseis de gastrópodes e plantas encontrados, pôde-se atribuir idade provavelmente pleistocênica para a Formação Xaraiés (Almeida, 1945).

Já em 1965, o mesmo incluiu na Formação Xaraiés os depósitos de tufa em terraços nos vales de alguns rios da Serra da Bodoquena, como o rio Formoso. Além disso, identificou uma relação entre esta Formação e depósitos ativos constituintes de leitos de alguns rios modernos.

O trabalho de mapeamento do Projeto RADAM (Araújo *et al.* 1982) utilizou o nome Formação Xaiarés atribuído por Almeida (1945) para designar os depósitos de tufa da região da Serra da Bodoquena, e destacou depósitos de tufa associadas à cabeceira do rio da Prata e do rio Perdido e no vale do rio Formoso.

Entretanto, a Formação Xaraiés permaneceu sem estudos aprofundados até 1995, quando Boggiani e Coimbra (1995) identificaram três diferentes tipos de calcários de idade quaternária. Uma unidade foi nomeada de "Calcário Xaraiés", as quais estão predominantemente nas margens do Maciço do Urucum em Corumbá (MS) na forma de camadas de aproximadamente 10 m de espessura de calcretes.

O Calcário Xaraiés é o equivalente da Formação Xaraiés introduzida por Almeida (1943, 1945), porém sem os depósitos ativos de tufa (formados pela deposição bioinduzida de carbonatos em temperatura ambiente), os quais Boggiani e Coimbra (1995) denominaram pela primeira vez de Tufas da Serra da Bodoquena, uma unidade à parte. Também descreveram uma terceira unidade denominada de Calcário Pantanal do Miranda formado nas planícies de inundação dos rios Aquidauana, Abobral e Miranda. Essa subdivisão foi preliminar e com o objetivo principal de diferenciar os diferentes tipos de calcários continentais colocados de forma conjunta numa única unidade estratigráfica – Formação Xaraiés, sem

apresentar uma proposta estratigráfica formal, mas apontando para a necessidade dessa revisão estratigráfica.

Tufas da Serra da Bodoquena foram posteriormente subdivididas por Boggiani *et al.* (2002) em duas principais formas de ocorrência: uma como represas (barragens) e cachoeiras de tufas; e outra como micritas inconsolidadas (calcários pulverulentos).

Sallun Filho *et al.* (2004) reuniram os conhecimentos sobre a Serra da Bodoquena até aquele momento, apresentando as tufas como uma importante ocorrência que caracteriza o carste da Serra de Bodoquena. No livro foram destacadas as tufas calcárias presentes na forma de barragens e cachoeiras naturais ao longo dos principais rios que cortam o planalto da Bodoquena e as tufas calcárias pulverulentas (micríticas) encontradas em meandros abandonados desses mesmos rios.

Também foi citado que a origem das cachoeiras e barragens de tufas está relacionado ao alto teor de carbonato de cálcio das águas fluviais associado à atividade microbiana (cianofíceas) associada ao crescimento de musgo. Assim como as micritas inconsolidadas podem ter se originado por indução durante atividade fotossintetizante das cianofíceas em água parada.

Sallun Filho & Karmann (2007), em seu mapa geomorfológico do carste da Serra da Bodoquena, organizaram todas ocorrências de tufas em uma única unidade geomorfológica denominada "Planícies de Tufa".

Em 2009, Sallun Filho *et al.* propuseram a definição da Formação Serra da Bodoquena a qual engloba todos exemplos de depósitos de tufa da região da Serra da Bodoquena, separando as duas formas de ocorrência desses depósitos em membros. O Membro Rio Formoso constitui depósitos de tufas na forma de cachoeiras e represas, tanto os ativos quanto os antigos. O Membro São Geraldo constitui os depósitos antigos de micritas, o mesmo descrito por Boggiani *et al.* (2002) como micritas inconsolidadas (calcários pulverulentos).

Os calcretes, identificados pela primeira vez na Serra da Bodoquena e unidade basal da Formação Xaraiés, ocorrem em exposições restritas sob forma de corpos maciços e sob forma de lentes de vadóides, na base dos depósitos micríticos. (Oliveira, 2009)

Oliveira (2009) descreveu as tufas micríticas que formam a unidade intermediária da Formação Xaraiés, apresentando-se na forma de depósitos tabulares de estruturação maciça e espessura variando de 0,5 a 6 metros, além de grande quantidade de conchas de gastrópodes. Geralmente estão cobertos por camada de solo preto e situados às margens de rios atuais. Por essa razão são, por vezes, facilmente lavrados para uso como corretivo de solo ou como componente para ração animal (Oliveira, 2009).

O mesmo autor destacou as tufas do tipo fitohermal as quais compõe a unidade superior da Formação Xaraiés apresentando-se na forma de barragens, represas e cachoeiras, estas duas aparecendo como camadas de 2 a 3 cm de espessura, porosas e com filamentos calcíticos verticais, paralelos entre si. Entre as camadas de filamentos verticais,

existe uma lâmina milimétrica de calcita maciça e endurecida. Nessas lâminas de calcita maciça é que se encontram moldes de folhas de plantas.

Oliveira (2009) comentou que a subdivisão da Formação Xaraiés em mais formações não apresenta sentido estratigráfico, pois o sedimento é o mesmo - os micritos - apenas depositado em duas fases e submetidos a dois processos de alteração (calcretização e formação de tufas fitohermais). Porém concorda que seria considerado mais que o suficiente separar em membros os calcretes e depósitos de micritos inconsolidados, assim como foi proposto por Sallun Filho *et al.* (2009).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho o estudo das tufas foram realizados através da identificação dos principais tipos, com base na classificação de Pedley (1990) complementada por Ford & Pedley (1996) e sua aplicação nos depósitos da Serra da Bodoquena.

Por se tratar de um trabalho de sistematização, foram pesquisadas todas as publicações disponíveis sobre as tufas da Serra da Bodoquena assim como os trabalhos a respeito de outros depósitos, e coletadas e agrupadas as informações disponíveis de trabalhos anteriores, assim como documentação fotográfica.

De forma complementar, foram utilizadas imagens de satélite principalmente para delimitação de um tipo específico de tufas – as lacustres – por apresentarem maior expressão em área.

4.1. Classificação de tufas de Pedley (1990) e Ford & Pedley (1996)

A classificação de carbonatos continentais ainda gera muitas controvérsias na comunidade internacional em relação a distinção entre os principais representantes desses depósitos: tufas, travertinos e espeleotemas.

Os trabalhos de Pedley (1990) e Ford & Pedley (1996) criaram certo consenso para a aplicação desses três termos. O termo “tufa” deriva do latim *tophus* e designa carbonatos de água doce formados a temperatura ambiente, que apresentam alta porosidade, baixos teores de terrígenos e restos orgânicos de animais, plantas e bactérias.

O termo “travertino” deriva de *lâpis tiburtinus*, antigo nome da cidade italiana de Tivoli, e indica carbonatos que se formam a partir de águas termais, com temperaturas superiores a 40°C sem influência direta de organismos.

Por último, o termo “espeleotema” engloba uma grande porção de formas geradas na zona afótica de cavernas por meio de processos físico-químicos de nucleação e precipitação de carbonato de cálcio, sem envolvimento de atividade biológica durante a gênese.

Além de discutir a aplicação correta dos nomes, a publicação de Pedley em 1990 expõe uma classificação das tufas calcárias baseada na petrografia e depois conforme modelos ambientais.

Desse modo, petrograficamente as tufas podem ser classificadas em autóctones ou clásticas. As autóctones subdividem-se em fitoherma *framestone* ou *boundstone*. Já as clásticas classificam-se em tufa fitoclástica, tufa *cyanolith* "oncoide", tufa intraclástica, tufa micro-detrita e paleossolos (tabela 1).

Tabela 1 - Classificação petrográfica de tufas (modificado de Pedley, 1990).

Autóctone		Clástica
fitoherma	<i>framestone</i>	tufa fitoclástica
		tufa <i>cyanolith</i> 'oncoide'
		tufa intraclástica
	<i>boundstone</i>	tufa microdetrital
		paleossolos

Tabela 2 - Modelos ambientais formadores de tufas (modificado de Pedley, 1990)

Ambiente		Sub-ambientes	
Modelos	<i>Perched springline</i>	proximal	
		distal	
	Cascata		
	Fluvial	entrelaçado	
		barragem	fitoherma <i>framestone</i>
	depósitos lacustres		
	Lacustre		
Paludal			

Os cinco modelos ambientais propostos por Pedley (1990) são: 1- vertente (depósito distal ou depósito proximal); 2- cascata; 3- fluvial (modelo entrelaçado ou modelo de barragem); 4- lacustre; 5- paludal. O modelo de barragem subdivide-se em fitoherma *framestone* ou depósitos lacustres (tabela 2). Raramente um sistema natural é composto por apenas um desses modelos. De qualquer modo, a maioria das ocorrências naturais possuem elementos que se encaixam ao menos em um desses modelos.

Já o trabalho de Ford & Pedley em 1996 agrega à proposta de classificação anterior uma caracterização com base na origem genética de vários componentes aloquímicos dominantes, gerando uma classificação mais complexa, como mostra a tabela 3.

Ford & Pedley (1996) reuniram nesse trabalho um resumo a maioria dos depósitos de tufa do planeta Terra. O curioso é que mesmo exibindo relevante expressão em relação ao tamanho, variedade e beleza, a Serra da Bodoquena não foi mencionada em nenhum momento ao longo desse trabalho.

Tabela 3 - Classificação de tufas (modificado de Ford & Pedley, 1996).

Alóctone			Autóctone
Tufa micro-detrítica	Tufa macro-detrítica		Tufa fitohermal
suportado por matriz		suportado por grãos	(a) camadas de micrita ou peloides (tipo estromatolítico)
tufa micrítica	tufa oncoide e <i>cyanolith</i>		
tufa peloidal	tufa intraclástica		
Tufa sapropelítica (rica em matéria orgânica)	tufa fitoclástica		(b) microherma, forma de colônias de bactérias
Tufa litoclástica (rica em matéria inorgânica)	tufa litoclástica		(c) forma de coral, com macrófitas recobertas e cinmento mcritico
<i>Lime mudstone</i>	<i>Wackestone/Packestone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Boundstone</i>

4.2. Sensoriamento Remoto

A análise por sensoriamento remoto iniciou-se com a obtenção de 2 imagens do satélite Landsat 8/OLI, ambas de julho. A região da Serra da Bodoquena apresenta um clima tropical úmido, com uma estação seca (com destaque para julho e agosto) e outra chuvosa (com destaque para os meses de novembro, dezembro e janeiro) bem marcadas. As imagens de julho foram escolhidas por apresentarem menor índice de nuvens devido ao período de estiagem.

Alguns métodos de processamento digital de imagem foram aplicados utilizando o programa ENVI, como cálculos de razões de banda por exemplo NDVI (índice normalizado diferencial de vegetação) e NDWI (índice normalizado diferencial de água). Foi utilizado como guia ocorrências de tufas calcárias fornecidas e obtidas por William Sallun Filho em campo. Aqui está descrito o que apresentou o resultado mais significativo: a análise dos componentes principais.

A análise dos componentes principais - ACP ou PCA (do inglês *Principal Component Analysis*) é um método que tem por finalidade básica, a análise dos dados usados visando sua redução, eliminação de sobreposições e a escolha das formas mais representativas de dados a partir de combinações lineares das variáveis originais.

Ela tem como principal objetivo determinar a extensão da correlação existente entre as bandas e, através de uma transformação matemática apropriada, remover a correlação existente entre as bandas. Os componentes principais consistem na geração de novas bandas, não correlacionadas, de tal forma que o máximo de informação possível se encontra nos primeiros componentes.

5. RESULTADOS

A partir do levantamento e descrição dos diferentes tipos de tufas na Serra da Bodoquena foram identificados três tipos (tabela 4).

Tabela 4 - Tipos de tufas da Serra da Bodoquena

Tipo de tufa	Exemplos	Localização	Observação
Tufa micrítica	Lavra da Mineração Xaraés (Rio Formosinho)	Várzeas dos rios Formosos, Formosinho e Prata (leste da Serra do Rio Perdido) e várzea da porção superior do Rio Perdido	Depósitos econômicos já lavrados ou em lavra
Cachoeira de tufa	Cachoeira do Taika (Rio Mimoso) Cachoeira do Aquidabã	Concentradas ao longo do Rio Mimoso, alguns importantes no Rio Aquidabã	
Barragem de Tufa	Barragens ao longo do Rio Formoso (Ilha do Padre). Na cabeceira do Rio Formoso, foram identificadas barragens com paredes paralelas (barragens duplas)	Rio Formoso e Rio Perdido. Em menor expressão, em rios de menor volume como o Rio Betione, além das demais drenagens secundárias	

5.1. Tufas micríticas

Um dos primeiros trabalhos envolvendo este tipo de tufa foi o de Davis (1900) no qual ele estudou tufas micríticas de vários lagos do Estado de Michigan (EUA) e as denominou como *marl*, atribuindo sua formação principalmente à atividade fotossintetizante de algas do gênero *characea*.

Dean (1981), estudando a formação desses mesmos depósitos em lagoas alcalinas, considerou também como mecanismo mais importante de precipitação a absorção de CO₂ por meio da atividade fotossintetizante (aumento do pH e da saturação de carbonato) de fitoplâncton e a atividade de algas caráceas.

Essa formação é conhecida como precipitação bioinduzida e se sustenta pela equação: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$, na qual a remoção do dióxido de carbono desloca o equilíbrio para a esquerda, favorecendo a precipitação de carbonato.

Whitings são considerados responsáveis pela maioria desse tipo de sedimentos carbonáticos finos (tufas micríticas) mantidos em suspensão tanto em lagos alcalinos como em ambientes marinhos carbonáticos (Thompson *et al.*, 1997). Dois modelos vêm sendo propostos para explicar os eventos lacustres: 1- precipitação inorgânica numa coluna d'água devido a mudanças na temperatura e atividades iônicas relacionadas a variações climáticas sazonais; 2- precipitação bioinduzida devido à remoção de CO₂ pela fotossíntese.

Thompson *et al.* (1997) por meio de trabalhos em Fayetteville Green Lake (Nova Iorque, EUA) evidenciaram o mecanismo, estudado por Thompson & Ferris (1990), no qual íons interagem diretamente com a superfície de uma cianobactéria unicelular, a *Synechococcus*, para precipitar minerais de carbonato. Há forte correlação entre o evento *whiting* no *Green Lake* com o *bloom* da cianobactéria, o qual é desencadeado pelos aumentos das temperatura e luz.

O experimento feito por Thompson & Ferris (1990) mostra que o metabolismo fotossintetizante da cianobactéria é diretamente responsável pela alcalinização de seu microambiente devido a sua habilidade de usar o HCO₃⁻ como fonte primária de carbono inorgânico.

Nesse mesmo experimento, há indícios de que a cianobactéria conduz o intercâmbio HCO₃⁻/OH⁻ através da membrana celular e os íons hidroxilas são produzidos como resultado da fixação do HCO₃⁻ na fotossíntese. Isso é suportado pelo fato do pH do microambiente experimental ter aumentado ao longo do experimento.

Portanto, essa cianobactéria induz a calcificação em ambientes alcalinos devido ao seu processo de fotossíntese que provém a alcalinização. Além disso, essas bactérias ativamente excluem íons de cálcio para manter a baixa concentração de cálcio intracelular, o que auxilia na geração desse microambiente, enriquecido em cálcio, ao redor da célula. A

presença de luz induz a calcificação pela cianobactéria por meio do aumento do pH desse microambiente (Thompson & Ferris, 1990).

Desse modo, o microambiente envolvendo as células tem pH elevado devido a fotossíntese, assim como concentração elevada de cálcio devido à ligação entre Ca^{2+} e a membrana celular. Os cátions de cálcio concentrados na superfície da célula da cianobactéria podem agir como nucleações para a precipitação de calcita, em resumo, a precipitação de carbonato (Thompson & Ferris, 1990; Riding, 2000), conforme exemplificado na figura 1, entretanto, ainda é incerto até que ponto há exatamente a contribuição inorgânica e orgânica para a formação dos *whittings*.



Figura 1 - Exemplo de nucleações com a precipitação de calcita em tufa micrítica na Serra da Bodoquena.

5.2. Cachoeiras de tufas

Diferentemente das tufas micríticas, Emeis *et al.* (1987) demonstra que as cachoeiras do parque nacional de Plitvice (Croácia) apresentam a supersaturação de CaCO_3 essencial para a precipitação de calcita, porém, isso não é suficiente para desencadear a precipitação nessas cachoeiras e barreiras.

Segundo eles, a nucleação é a chave para o início da precipitação, e essa nucleação se dá por meio dos produtos metabólicos de cianobactérias e algas que geram um muco proteico que recobre sua colônia, também conhecida como biofilme, e é capaz de reter os

cristais de calcita já formados e que estão em suspensão, tanto por aderência quanto por diferença de carga eletrostática.

Esse processo começa com o acoplamento de diatomáceas por meio de excreções mucosas agindo como cola. Rapidamente esse conjunto forma uma densa e grossa esteira na superfície do musgo (figura 2). Essa esteira age como filtro para as partículas de micrita carbonáticas pré-existentes. Algas e bactérias se assentam nessa esteira e contribuem na densidade dessa superfície de retenção, facilitando a aderência num meio de correntes de água de maior velocidade, assim esses grãos de carbonatos constituem sítios iniciais para a precipitação (núcleos de cristais).



Figura 2 - Detalhe para o musgo essencial para a formação das tufas do tipo cachoeira e barragem (escala milimétrica).

No geral, as tufas em cachoeiras e barragens (abordadas com mais detalhes no item 5.3) apresentam destacada laminação e ritmicidade, o que é observado também nas tufas da Serra da Bodoquena, como a apresentada na Figura 3.

Questão investigada em detalhe sobre as tufas tem sido as causas da típica laminação e sua representividade paleoclimática (Andrews & Brasier, 2005). No geral, as tufas apresentam alternância de laminações milimétricas de micrita maciça e relativamente densa alternada com camadas mais espessas porosa, de 1 a 2 cm de espessura, de calcita mais cristalizada (*sparry crystalline calcites*).

Estudo de tufas modernas no Japão (Hori *et al.*, 2009 e Kano & Fujii, 2000) demonstraram que as taxas de precipitação de carbonato de cálcio seriam maiores no verão

e menores no inverno e primavera, o que resulta na formação de lâminas calcificadas densas, devido a incrustação de calcita nos filamentos de cianobactérias e cimentação de porosidades alternadas com lâminas mais porosas e frágeis formadas no inverno, relação essa confirmada por dados de isótopos de C e O (Andrews & Brasier, 2005). Essa alternância textural das lâminas seria uma resposta do maior crescimento das colônias de cianobactérias no verão, devido a maior temperatura e luminosidade.

Uma questão a ser investigada com maior detalhe, nas tufas da Serra da Bodoquena, é a influência do musgo, que parece ser mais intensa comparada às tufas de regiões de clima mais temperado e com sazonalidade mais acentuada e a relação entre as camadas mais porosas. O maior crescimento (camadas mais espessas) ocorre nas associadas aos talos dos musgos do que nas lâminas maciças (camadas menos espessas, não superior a alguns milímetros). A princípio, poderia se associar o crescimento das tufas associadas aos musgos (*moss tufa*) e aos meses de verão, porém nos períodos mais chuvosos, as lâminas de água são mais espessas e talvez não apropriado para o crescimento de musgo, o que pode ocorrer no inverno.

Em estudos sobre tufas antigas e modernas na Serra das Araras, ao norte, no estado de Mato Grosso, Correa & Auler (2006) interpretaram que os períodos de maior crescimento de tufa, relacionada às camadas mais espessas, seriam os meses de inverno, com menor incidência de chuvas ou mesmo condições nulas de precipitação pluviométrica. A interpretação tem por base a premissa de que nos períodos sem chuva (inverno) apesar do fluxo de água reduzido a turbulência das águas seria maior, devido ao tipo de tufas, predominantemente em cachoeiras, o que proporcionaria maior precipitação de calcita no verão, com maior incidência das chuvas. Relacionaram também o menor volume das águas à maior concentração de bicarbonato dissolvido. Já no verão, com maior volume de água, a diluição também seria maior, diminuindo o potencial de precipitação e, também, aumentaria o potencial erosivo, o que impediria a formação da tufa.

Os autores acima não levaram em consideração a influência do crescimento do musgo no processo, mas mostra que a determinação da causa da alternância sazonal do tipo de lâmina é uma questão que merece ainda ser melhor investigada.

As cachoeiras de tufas encontram-se concentradas ao longo do Rio Mimoso, que é um dos rios com maior gradiente hidráulico em região onde afloram os metassedimentos da Formação Guaicurus e diamictitos metamorfizados da Formação Puga, o que proporciona relevo mais acidentado. Entre as cachoeiras desse rio, destaque é dado à cachoeira do Taíka, em função do maior desnível e concentração de tufas (figura 3).



Figura 3 - Cachoeira do Taika (fotografia Paulo Robson de Souza)

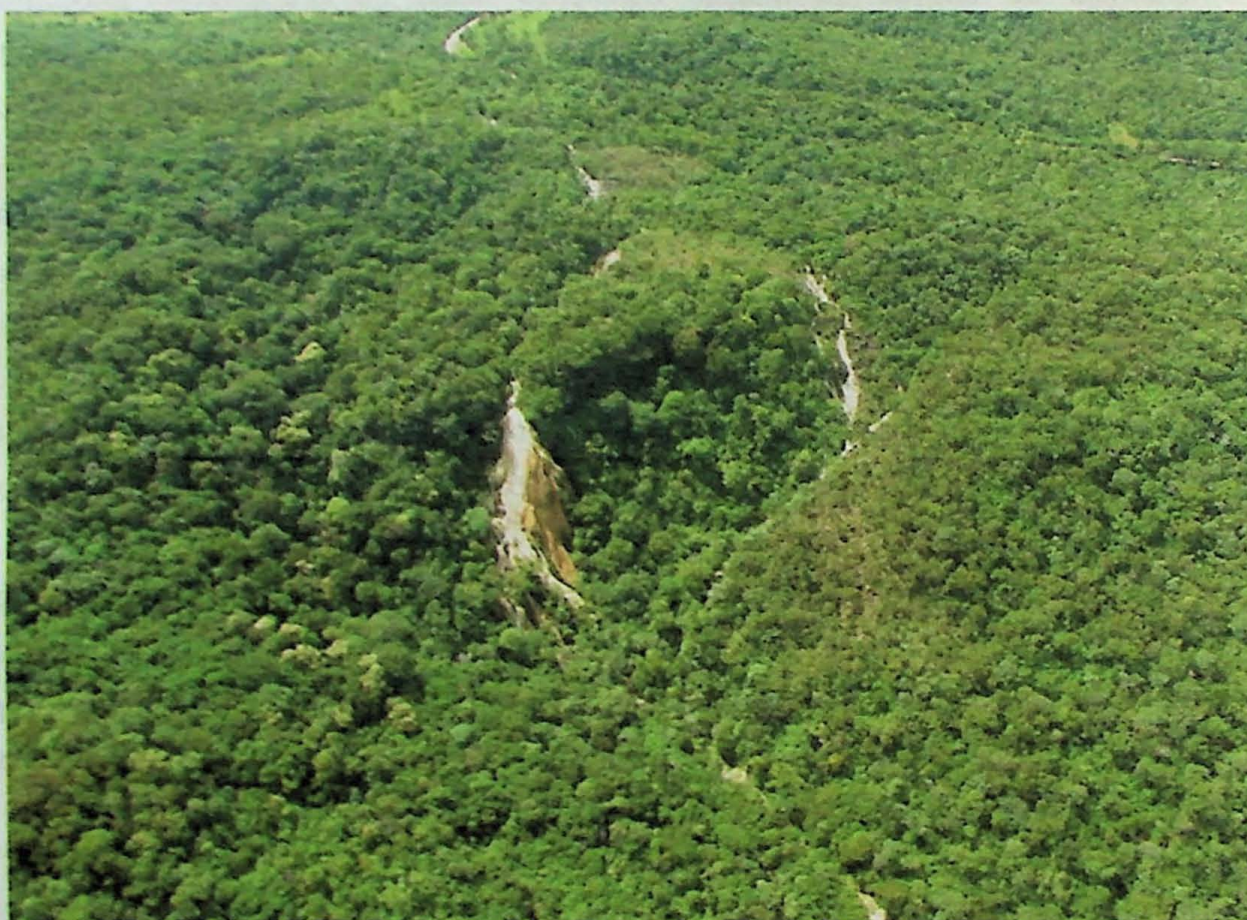


Figura 4 - Cachoeira do Aquidaban, na borda oeste do Planalto da Bodoquena (fotografia – Juca Ygarapé).

O crescimento das tufas na forma de cachoeiras permitam que cresçam na forma de concha com a convexidade para cima, com formação de cavernas. Devido ao fato de serem cavernas atípicas, formada pelo crescimento de tufas envoltórias a espaços, ao contrário do processo de dissolução que dá origem às cavernas no geral, essas cavidades são denominadas "grutas acrecionais". Existe uma cavidade desse tipo na margem esquerda do rio Formoso que apresentam por volta de 20 m de desenvolvimento,

Além das cachoeiras de tufas do rio Mimoso, duas cachoeiras isoladas, mas relativamente maiores, são a do atrativo conhecido como Boca da Onça, em paredão que ladeia o rio Salôbra, e a cachoeira do Aquidaban, na borda oeste do Planalto da Bodoquena (Figura 4).

5.3. Barragem de tufas

As barragens de tufas são os tipos mais comuns e abundantes ao longo dos rios da Serra da Bodoquena. Apesar de mais conhecidas ao longo do rio Formoso, em função da atração turística, é no rio Perdido, no trecho interior ao Parque Nacional da Serra da Bodoquena, é que se encontra sua maior expressão (figura 5).



Figura 5 - Barragens de tufas ao longo do rio Perdido, no interior do Parque Nacional da Serra da Bodoquena (fotografia de Juca Ygarapé).

Em função de apresentarem a característica hidrodinâmica de barragem, são as que proporcionam maior acumulação de folhas, em comparação às tufas de cachoeiras e, por esse motivo, apresentam inúmeros moldes de folhas.

Devido ao potencial de preservação de folhas fósseis, a fim de se entender o processo, estudo das tufas de barragens em atividade foi desenvolvido por Cristalli (2006) a fim de comparar com moldes de folhas fósseis de tufas inativas na Caatinga Nordestina (Auler *et al.* 2004).

As barragens de tufas ocorrem nos rios de maior volume de água, como o rio Formoso e o rio Perdido e, em menor expressão e relativamente de menores alturas, em rios de menor volume como o rio Betione, além das demais drenagens secundárias.

Na estrada que liga a cidade de Bonito à Fazenda Baía das Garças, ocorre depósito de tufa antigo rico em moldes de folhas. Em função da ocorrência desse depósito antigo em encosta, interpreta-se que pertencia à antiga drenagem, com a formação de barragens (figura 6).

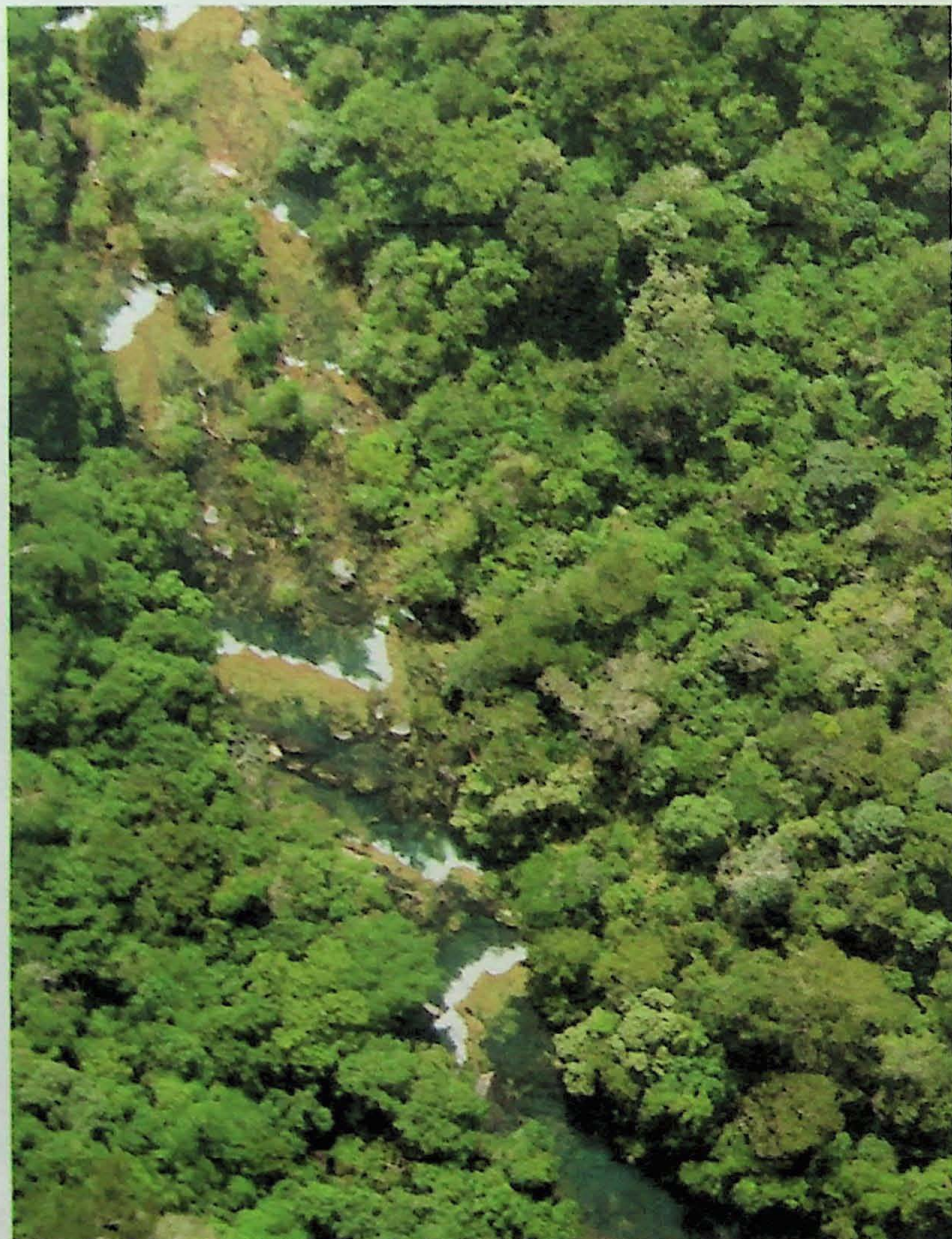


Figura 6 - Detalhe das barragens de tufa ao longo do rio Perdido (fotografia Juca Ygarapé).

Conformação excepcional de barragens de tufas são as encontradas na porção superior do rio Formoso, quase na cabeceira, na forma de cachoeiras paralelas e inativas, chamada informalmente de “muralhas de tufas”, devido ao formato de parede em área plana. Essas formações são observadas em imagens de satélite (figura 7), e pouco ou nada visualizadas devido ao recobrimento da vegetação.

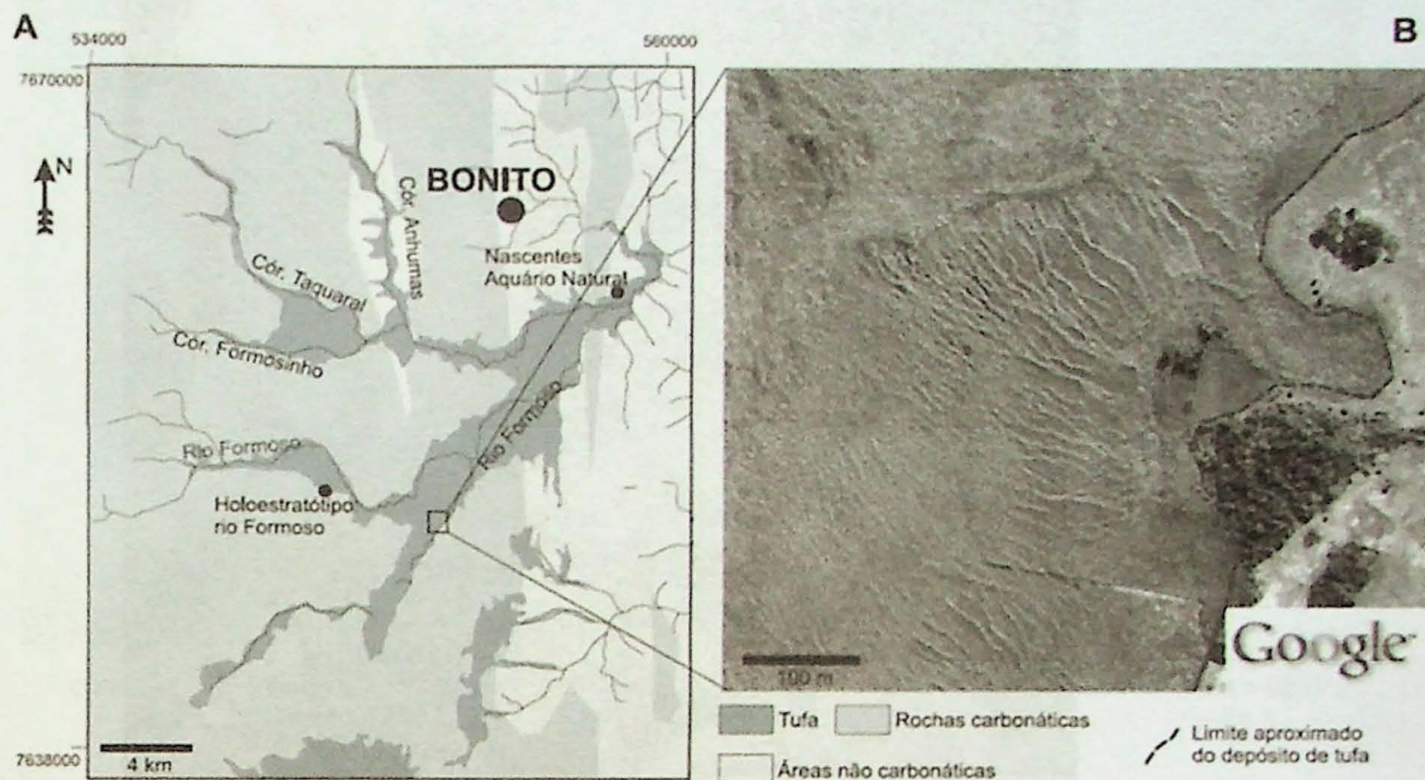


Figura 7 - Depósitos do rio Formoso: A - mapa geológico da Formação Serra da Bodoquena e seu embasamento (simplificado); B - imagem de detalhe da planície do rio Formoso (drenagem atual à direita) com depósitos antigos de tufa da Formação Serra da Bodoquena (imagem Google Earth™ serviço de mapa) mostrando sequência de represas justapostas (modificado de Sallun filho *et al.* 2009)

As fotografias das figuras 8 e 9 foram tiradas dias após queimada, que removeu a vegetação, facilitando a observação das barragens dupla de tufa.



Figura 8 - Detalhe das barragens de tufa com paredes paralelas, na cabeceira do rio Formoso.



Figura 9 - Barragens paralelas de tufa inativa da cabeceira do Rio Formoso



Figura 10 - Parede interna da barragem de tufa, demonstrando o aprisionamento da água e faixa de crescimentos

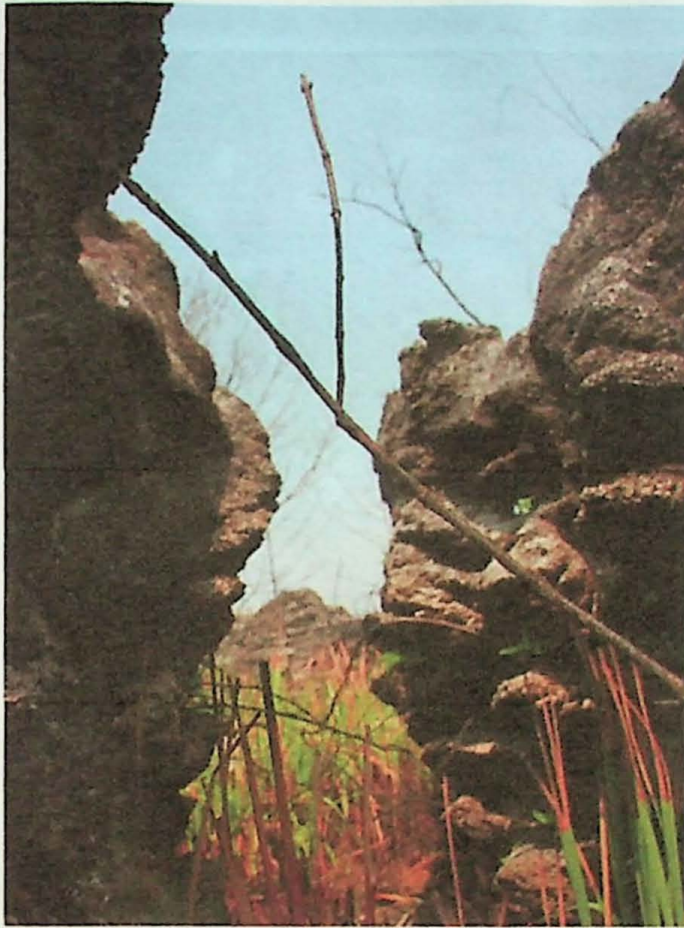


Figura 11 - Imagens da parte interna entre as duas paredes da barragem de tufa, por onde escorria a água represada nas paredes laterais.

5.4. Sensoriamento remoto

A aplicação da técnica de Principais Componentes utilizou as bandas 5, 6 e 7 combinadas em um grupo. A região de interesse está localizada em duas imagens de satélite (uma ao norte e outra ao sul do parque da Serra da Bodoquena), portando dois grupos foram analisados. Após selecionadas as bandas de interesse, automaticamente aplicou-se a técnica. Como resultado obteve-se três componentes principais para ambas imagens.

Para fins deste estudo, utilizou-se somente a primeira componente principal para a imagem de satélite da região sul e a segunda componente principal para a imagem da região norte, ambas escolhidas por apresentarem o melhor resultado em comparação às outras principais componentes.

As imagens dessas duas componentes principais apresentaram uma diferença textural significativa das tufas em relação aos arredores; é uma textura de miscelânea. A variedade de tons cinza é devido aos diferentes tipos de refletância e indica diferentes tipos de materiais presentes. A figura 12 apresenta um destaque das tufas. O resultado inteiro para região de interesse apresenta-se como a base do mapa anexo deste trabalho.

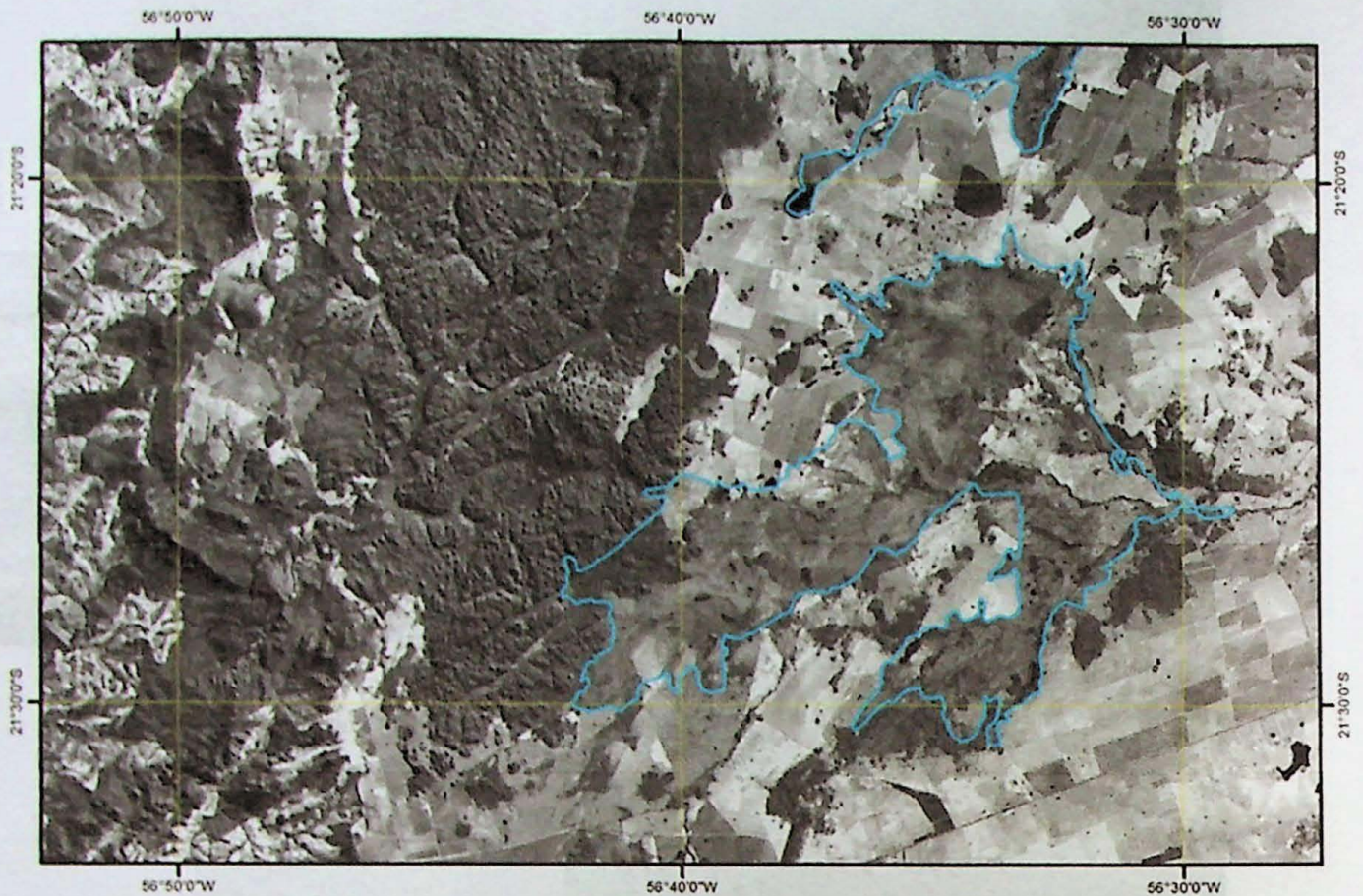


Figura 12 - Detalhe para a diferença de textura do corpo de tufas micríticas (contorno em azul, aproximadamente 20 km de comprimento) comparado aos arredores.

6. DISCUSSÃO

Apesar do destaque das tufas por meio das análises por sensoriamento remoto, novos corpos de tufa não puderam ser identificados. Essa análise determina que os corpos de tufa apresentam uma textura particular, mas não se pode determinar os diferentes tipos de tufa, principalmente devido a extensão dessas tufas para a análise. Outro fator é a pouca variedade composicional das tufas, que são muito ínfimas para serem captadas por sensoriamento remoto

Entretanto, a partir da síntese efetuada, foi possível compreender que os corpos de tufas da região da Serra da Bodoquena podem ser separados em duas categorias, segundo a classificação de proposta por Pedley (1990): tufas calcárias do fitohermais sob o modelo ambiental fluvial do tipo barragem (fitoherma *framestone*); e tufas calcárias micríticas sob o modelo ambiental do tipo lacustre.

Entre os tipos de tufas presentes na Serra da Bodoquena (Formação Serra da Bodoquena), pode se individualizar três tipos principais – 1) tufas micríticas; 2) cachoeiras de tufas e 3) barragens de tufas.

As tufas micríticas ocorrem em grandes extensões em áreas, com dezenas de quilômetros de extensão, e espessuras de até 10 m de material relativamente homogêneo.

Estão presentes nas cabeceiras dos principais rios, como o rio Perdido e rio Formoso, e estariam associados a possíveis barramentos pretéritos. Já a concentração de cachoeiras de tufas ocorrem ao longo de rios com maior desnível e em relevo mais acidentado, como é o caso do Rio Mimoso, que corta metassedimentos (diamictitos) da Formação Puga.

As tufas na forma de barragens ocorrem ao longo de rios que cortam o maciço calcário, como o rio Perdido, no interior do Parque Nacional da Serra da Bodoquena e o rio Formoso. Cachoeiras isoladas, e relativamente maiores que as demais, são as do Aquidaban, quando o rio de mesmo nome se encontra no desnível abrupto do planalto e na cachoeira da Boca da Onça, onde o rio encontra a escarpa do vale do rio Salobra.

7. CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, pode-se concluir que a aplicação de técnicas de processamento de imagens contribuiu significativamente para a melhoria da qualidade dos dados, especialmente no caso de mapeamento com intuito de manejo da terra.

As técnicas de processamento aplicadas apresentaram resultados não tão satisfatórios como esperados, porém colaboraram para a identificação e interpretação dos elementos presentes na imagem.

A técnica por componentes principais mostrou-se eficaz na identificação das bordas dos alvos e na qualidade visual dos dados, quando comparada a outros métodos de classificação de imagens.

A sistematização das informações sobre as tufas possibilitou classificar os principais tipos, com interpretações sobre a origem, com destaque para a influência do crescimento de musgos (*moss tufa*) e relacionar os principais tipos com a forma do relevo e substrato rochoso.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M. (1943). *Geomorfologia da região de Corumbá*. *Boletim da Associação dos Geógrafos Brasileiros*, 3(3), 08-18.
- Almeida, F. F. M. (1945). Geologia do sudoeste mato-grossense. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*, DNPM, Rio de Janeiro, 116, 01-118.
- Almeida, F. F. M. (1965). Geologia da Serra da Bodoquena (Mato Grosso), Brasil. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*, DNPM, Rio de Janeiro, 219, 01-96.
- Andrews, J. E. & Brasier, A. T. (2005). Seasonal records of climatic change in annually laminated tufas: short review and future prospects. *Journal of Quaternary Science*, 20, 411-421.
- Araújo, H. J. T.; Santos Neto, A.; Trindade, C. A. H.; Pinto, J. C. A.; Montalvão, R. M. G.; Dourado, T. D. C.; Palmeira, R. C. B.; Tassinari, C. C. G. (1982). Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL. *Folha SF-21 Campo Grande*. Rio de Janeiro: MME, p. 9 -124. (Levantamento de Recursos Naturais, 28).
- Auler, A. S.; Wang, X.; Edwards, R.; Lawrence, Cheng, H; Cristalli, P. S.; Smart, P L; Richards, D. A. (2004). *Quaternary ecological and geomorphic changes associated with rainfall events in presently semi-arid northeastern Brazil*. *Journal of Quaternary Science*, 19(7): 693-701.
- Boggiani, P. C.; Coimbra, A. M. (1995). *Quaternary limestones of the Pantanal Area, Brazil*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 67(3): 343-349.
- Boggiani, P. C.; Coimbra, A. M.; Gesicki, A. L.D.; Sial, A. N.; Ferreira, V. P.; Brenha Ribeiro, F.; Flexor, J. M. (2002). Tufas Calcárias da Serra da Bodoquena, MS: cachoeiras petrificadas ao longo dos rios. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Queiroz, E. T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. (Eds.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília: DNPM, p. 249-259.
- Correa, D.; Auler, A. S. (2006). Caracterização, cronologia e gênese das tufas da Serra das Araras, Mato Grosso. *Simpósio De Geotecnologias no Pantanal*, 1. Campo Grande (MS). Anais. Campo Grande (MS): Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.165-174.

- Cristalli, P. S. (2006). *Macrofitófósseis em tufos calcários quaternários do norte da Bahia como indicadores paleoclimáticos*. Tese (Doutorado), São Paulo: Instituto de Geociências USP.
- Davis, C. A. (1900). A contribution to the natural history of marl. *Journal of Geology*, 8, 485-497.
- Dean, W. E. (1981). Carbonate minerals and organic matter in sediments of modern north temperate hard-water lakes. *Recent and Ancient Nonmarine Depositional Environments: Models for Exploration: Society of Economic Paleontologists Mineralogists, Special Publication*, 31, 213–231.
- Emeis K.C.; Richnow, H. H.; Kempe, S. (1987). Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia: chemical versus biological control. *Sedimentology*. 34(4), 595–609.
- Ford, T.D.; Pedley, M. (1996). A review of the tufa and travertine deposits of the World. *Earth-Sciences Review*, 41, 117–175.
- Hori, M., Kawai, T., Matsuoka, J. and Kano, A. (2009) Intra-annual perturbation of stable isotopes in tufas: Effects of hydrological processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 1684-1695.
- Kano, A.; Fujii, H. (2000). Origin of gross morphology and internal texture of tufas of Shirokawa Town, Ehime Prefecture, southwest Japan. *Journal of Geological Society of Japan*, v.106: 397-441.
- Oliveira, E. C. (2009). *Tufas calcárias da Serra da Bodoquena, MS*. Dissertação (Mestrado), São Paulo: Instituto de Geociências USP.
- Pedley, H.M. (1990). Classification and environmental models of cool freshwater tufas. *Sedimentary Geology*, 68, 143–154.
- Riding, R. (2000). Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47, 179-214.
- Sallun Filho, W.; Karmann, I. (2007). Geomorphological map of the Serra da Bodoquena karst, west-central Brazil. *Journal of Maps*, p. 282-295. Disponível em: <<http://www.journalofmaps.com/>>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- Sallun Filho, W.; Karmann, I.; Boggiani, P. C. (2004). Paisagens Cársticas da Serra da Bodoquena (MS). In: Manteco-Neto, V; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito-Neves,

B. *Geologia do Continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Ed. BECA. São Paulo, p. 423-433.

- Sallun Filho, W.; Karmann, I.; Sallun, A. E. M.; Suguio, K. (2009). Quaternary tufa in the Serra da Bodoquena karst, west-central Brazil: Evidence of wet period. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions)*, v. 6. Disponível em: <http://www.iop.org/EJ/article/1755-1315/6/7/072055/ees9_6_072055.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- Sallun Filho, W.; Karmann, I.; Boggiani, P. C.; Petri, S.; Cristalli, P. S.; Utida, G. A. (2009). Deposição de tufas Quaternárias no Estado de Mato Grosso do Sul: Proposta de Definição da Formação Serra da Bodoquena. *Geologia USP. Série Científica*, 9:47-60.
- Thompson, J. B. & Ferris, F. G. (1990). Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite, and magnesite from natural alkaline lake water. *Geology*, 18, 995-998.
- Thompson, J. B.; Schultze-Lam, S.; Beveridge, T. S.; Marais; D. J. D. (1997). Whiting events: Biogenic origin due to the photosynthetic activity of cyanobacterial picoplankton. *Limnology and Oceanography*, 42(1), 133–141.
- Wright, V. P. (2012). Lacustrine carbonates in rift settings: the interaction of volcanic and microbial processes on carbonate deposition. *Geological Society, London. Special Publications*, v. 370.

**9. ANEXO - MAPA DA DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE TUFAS NA SERRA DA
BODOQUENA (MS)**

