

**ARIANE ANDREOLA**

**RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE SAMAMBAIAS E  
LICÓFITAS E O TEOR DE ELEMENTOS-TRAÇO EM ÁREAS  
DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE CARVÃO EM SANTA  
CATARINA, SUL DO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Ciências Agrárias da Universidade do Estado  
de Santa Catarina, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Dra. Mari Lucia Campos

**LAGES, SC  
2015**

A559r Andreola, Ariane

Relação entre a presença de samambaias e licófitas e o teor de elementos-traço em áreas degradadas pela mineração de carvão em Santa Catarina, sul do Brasil / Ariane Andreola. - Lages, 2015.

158 p. : il. ; 21 cm

Orientadora: Mari Lucia Campos

Inclui bibliografia.

Tese (doutorado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveteinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2015.

1. Depósitos de rejeito e estéreis. 2. Drenagem ácida de mina. 3. Degradação ambiental. 4. Levantamento de espécies vasculares. I. Andreola, Ariane. II. Campos, Mari Lucia. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Setorial do CAV/ UDESC



**ARIANE ANDREOLA**

**RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE SAMAMBAIAS E  
LICÓFITAS E O TEOR DE ELEMENTOS-TRAÇO EM ÁREAS  
DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE CARVÃO EM SANTA  
CATARINA, SUL DO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

**Banca Examinadora**

|                        |                                                                         |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Orientador/Presidente: | <hr/> Dr <sup>a</sup> . Mari Lucia Campos<br>(UDESC – Lages-SC)         |
| Co-orientador:         | <hr/> Dr. Davi José Miquelutti<br>(UDESC – Lages-SC)                    |
| Membro externo:        | <hr/> Dr. Robson dos Santos<br>(UNESC – Criciúma-SC)                    |
| Membro externo:        | <hr/> Dr <sup>a</sup> . Luciane Costa de Oliveira<br>(IFSC – Lages-SC)  |
| Membro interno:        | <hr/> Dr <sup>a</sup> . Josiane Terezinha Cardoso<br>(UDESC – Lages-SC) |
| Membro interno:        | <hr/> Dr <sup>a</sup> . Maria Raquel Kanieski<br>(UDESC – Lages-SC)     |

**Lages, SC, 24/04/2015**



À Deus, a minha filha, ao meu marido, a  
meus pais e a minha irmã,  
Dedico.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a oportunidade divina que me foi na busca do conhecimento.

A minha amada filha Isadora e ao meu marido Gilmar, por todo apoio, companheirismo, dedicação e amor na conquista dessa nova etapa.

Aos meus queridos pais Inês e Reonildo, pelo esforço, conselhos, apoio, carinho, ensinamentos e amor que sempre me foram dados.

A minha querida irmã Kaciane, por ser um exemplo para mim de perseverança, humildade, inteligência, dedicação e por toda ajuda que me destes.

A minha orientadora Dra. Mari Lucia Campos pela confiança que depositou em mim, pelos inúmeros auxílios e conselhos durante todo o período em que trabalhamos juntas e pelo exemplo de profissional, amiga, mulher e mãe que guardarei e seguirei como exemplo por toda minha jornada.

Ao Dr. Davi José Miquelutti pelo apoio e companheirismo durante minha passagem pela universidade.

Agradeço especialmente a bolsista e amiga Josieli que durante quatro anos esteve ao meu lado incansavelmente ajudando-me a conduzir e a organizar o trabalho.

Aos voluntários Aline, Aureanívea, Felipe, Flávia, Guilherme e Mushue que me auxiliaram na condução do trabalho.

Ao técnico e amigo José Ferraz Neto por toda ajuda e dedicação nas fases complexas do trabalho e pelas conversas produtivas e risadas que originaram uma amizade.

Aos amigos e colegas que sempre estiveram juntos em algum momento dessa etapa, Ana Claudia, Daniel, Luiz, Lele, Marta, Mateus, Myrcia, Paulinha, Walter e os inúmeros outros colaboradores, os meus sinceros agradecimentos.



À UDESC- CAV e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, a todos os professores e funcionários.

À CAPES pela disponibilidade da bolsa para a execução do trabalho.

Ao Dr. Cláudio Roberto Fonseca Souza Soares e aos bolsistas da UFSC pelo auxílio nas análises e execução do trabalho.

A Msc. Edilane Rocha – SATC/SC, a Dra. Vanilde Citadini-Zanette - UNESC e ao colega San Zatta Custódio, pelos ensinamentos, auxílio e informações concedidas.

Aos membros do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/SC e do Ministério Público de Criciúma – MPF/SC pelo auxílio e disponibilidade na busca e concessão de informações.

Este trabalho só se consolidou com o auxílio de todos vocês!

A todos, meus sinceros e infinitos agradecimentos!  
Muito obrigada por fazerem parte desta conquista!

Não sejas muito justo, e nem utilize sua sabedoria mais do que o necessário,  
para que não venhas a ser estúpido.  
Mário Quintana



## RESUMO

ANDREOLA, Ariane. **Relação entre a presença de samambaias e licófitas e o teor de elementos-traço em áreas degradadas pela mineração de carvão em Santa Catarina, sul do Brasil.** 2015. 158f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo - Área: Caracterização, Conservação e Uso dos Recursos Naturais) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias, Lages, 2015.

Na Bacia Carbonífera Catarinense a exploração do carvão mineral deixou marcas profundas de degradação no ecossistema local, restringindo o uso futuro das áreas atingidas pela atividade. O processo de mineração e a disposição inadequada e sem controle dos resíduos (rejeito-piritoso e estéreis) praticados no passado, culminou na formação de vultuosos depósitos a céu aberto modificando a paisagem. Esses rejeitos contém alta concentração de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que na presença de ar e água, oxida-se, promovendo a formação da drenagem ácida de mina (DAM), um dos maiores impactos ambientais do setor mineral. A DAM é uma solução aquosa, fortemente ácida e rica em sulfato e ferro, além de outros elementos-traço associados, que inviabiliza os recursos hídricos e o solo extinguindo a fauna e a flora, ocasionando impacto social e econômico. Diante disso, o trabalho teve como objetivo fornecer informações a respeito da caracterização química e do teor total de elementos traços (Cd, Pb, Ni, Zn) no rejeito e estéreis de 23 depósitos da Bacia Carbonífera Catarinense e realizar um levantamento das espécies de samambaias e licófitas que ocorrem naturalmente nesses depósitos, avaliando seu possível potencial na colonização das áreas degradadas pela mineração de carvão. O trabalho foi realizado em 23 depósitos de rejeito e estéreis distribuídos em seis municípios, Criciúma, Forquilha, Lauro Müller, Siderópolis, Treviso e Urussanga. Foram coletadas amostras de rejeito e estéril e das espécies de samambaias e licófitas existentes em cada local. Realizou-se uma caracterização dos atributos químicos, pH em água e pH em KCl, teores de Ca, Mg, P, K, Na, Mn, Fe, Al, argila e teores de M.O e a determinação dos teores totais dos elementos-traço Cd, Pb, Ni e Zn, no rejeito e estéreis. A coleta das samambaias e licófitas foi realizada por meio de caminhar por

toda a extensão dos depósitos, sendo as mesmas catalogadas e incorporadas no Herbário LUSC da UDESC/CAV e no herbário CRI da UNESC. O rejeito e os estéreis da mineração são pobres quimicamente, provavelmente devido ao processo de DAM. Os teores totais dos elementos-traço Cd, Ni e Zn ficaram abaixo dos valores de prevenção estabelecidos pela resolução do CONAMA 420/2006 e os teores totais de Pb ficaram acima do valor de prevenção nos depósitos A7, A9, A2 e A18. Foram encontradas 16 espécies de samambaias e 1 espécie de licófitas, pertencentes a 14 gêneros e 11 famílias botânicas. Na preferência por ambientes a forma predominante foi local aberto. Para as formas biológicas, as samambaias hemicriptófitas foram mais frequentes enquanto as heliófitas sobressaíram-se quanto às adaptações ambientais. As espécies de samambaias e licófitas, encontradas nos depósitos de rejeito e estéreis demonstram resistência a ambientes degradados, sendo uma alternativa para projetos de recuperação e monitoramento ambiental, em áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto.

**Palavras-chaves:** Depósitos de rejeito e estéreis. Drenagem ácida de mina. Degradação ambiental. Levantamento de espécies vasculares.

## ABSTRACT

ANDREOLA, Ariane. **Relationship between the presence of ferns and lycophytes and the content of trace elements in areas degraded by coal mining in Santa Catarina, southern Brazil**. 2015. 158f. Thesis (PhD in Soil - Area: Characterization, Conservation and Use of Natural Resources) - University of the State of Santa Catarina. Graduate Program in Agricultural Sciences, Lages, 2015.

Catarinense Carboniferous Basin exploration of coal left deep marks degradation of the local ecosystem, restricting future use of areas affected by the activity. The process of mining and the improper disposal and uncontrolled waste (waste-pyritic and sterile) practiced in the past, led to the formation of any significance deposits in the open modifying the landscape. These tailings contain high concentrations of pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), in the presence of air and water, it oxidizes, promoting the formation of acid mine drainage (AMD), a leading environmental impacts of the mining sector. The DAM is an aqueous solution, strongly acidic and rich in sulfate and iron, and other trace elements associated, which prevents water resources and soil extinct fauna and flora, causing social and economic impact. Thus, the study aimed to provide information about the chemical and the total content of trace elements (Cd, Pb, Ni, Zn) in waste and barren of 23 deposits of Carboniferous Basin Santa Catarina and to survey the species of ferns and lycophytes naturally occurring in these deposits, assessing its possible potential for colonization of areas degraded by mining coal. The study was conducted in 23 deposits of tailings and sterile in six municipalities, Criciúma, Forquilha, Lauro Müller, Siderópolis, Treviso and Urussanga. Tailings samples were collected and sterile and species of ferns and lycophytes at each location. It performed a characterization of chemical properties, pH in water and pH in KCl, Ca, Mg, P, K, Na, Mn, Fe, Al, clay and OM content and the determination of total content of trace elements Cd, Pb, Ni and Zn in the waste and barren. The collection of ferns and lycophytes was performed by means of traversal along the length of the deposits, being cataloged and incorporated them in the Herbarium LUSC UDESC / CAV and herbal CRI of UNESC. The mining tailings and sterile are chemically poor, probably due to the DAM process. The total concentration of trace elements Cd, Ni and Zn

were below the values of prevention established by Resolution CONAMA 420/2006 and the total contents of Pb were above the value of prevention in deposits A7, A9, A18 and A2. 16 species of ferns and 1 kind of licófita, belonging to 14 genera and 11 botanical families were found. The preference for environments the predominant form was open spot. For the biological forms, hemicryptophytes ferns were more frequent while heliophytic stood out on environmental adaptations. The species of ferns and licófita, found in deposits of tailings and sterile demonstrate resistance to degraded environments, being an alternative to restoration projects and environmental monitoring in areas impacted by coal mining in the open.

**Key words:** Deposits of waste and barren. Acid mine drainage. Environmental degradation. Lifting vascular species.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Artigo I

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Localização das áreas de estudo .....                                                                                                        | 71 |
| Figura 2 – <i>Palhinhaea cernua</i> (L.) Vasc & Franco (a) e (b) .....                                                                                  | 77 |
| Figura 3 – <i>Anemia phyllitidis</i> (L.) Sw. (a) e (b) .....                                                                                           | 78 |
| Figura 4 – <i>Blechnum brasiliense</i> Desv. (a) <i>Blechnum serrulatum</i> Rich (b) .....                                                              | 79 |
| Figura 5 – <i>Cyathea atrovirens</i> (Langsd. & Fisch) Domim. (a) <i>Cyathea cf phalerata</i> Mart (b) .....                                            | 80 |
| Figura 6 – <i>Pteridum arachnoideum</i> (Kaulf) Maxon (a) e (b) .....                                                                                   | 81 |
| Figura 7 – <i>Elaphoglossum</i> sp. (a) <i>Lophosoria quadripinata</i> (J.F. Gmel.) C. Chr. (b) <i>Rumohra adiantiformis</i> (G. Farst.) Chng (c) ..... | 82 |
| Figura 8 – <i>Diacranopteris flexuosa</i> (Schrad). Underw (a) <i>Gleichenella pectinata</i> (Willd) Ching. (b) .....                                   | 83 |
| Figura 9 – <i>Nephrolepis cordifolia</i> (L.) C. Presl. (a) e (b) .....                                                                                 | 84 |
| Figura 10 – <i>Lygodium venustum</i> Sw. (a) e (b) .....                                                                                                | 85 |
| Figura 11 – <i>Pityrogramma calomelanos</i> (L.) Link (a) e (b) .....                                                                                   | 86 |
| Figura 12 – <i>Macrothelypteris torresiana</i> (Gaudich) Ching (a) <i>Thelypteris dentata</i> (Forssk) E.P.St. John. (b) .....                          | 87 |
| Quadro 1 – Descrição das áreas de estudo na região carbonífera de Santa Catarina .....                                                                  | 72 |

### Artigo II

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 13 – Localização das áreas de estudo nas três bacias hidrográficas da região carbonífera de Santa Catarina ..... | 109 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 14 – Mapas de localização dos depósitos de rejeito e estreis nos municípios de Criciúma (a1) (a2) e (a3) e Forquilha (b) .....                                                        | 110 |
| Figura 15 – Mapas de localização dos depósitos de rejeito e estreis nos municípios de Siderópolis (a1) e (a2) e Treviso (b).....                                                             | 110 |
| Figura 16 – <i>Macrothelypteris torresiana</i> (Gaudich) Ching (a) <i>Thelypteris dentata</i> (Forssk) E.P.St. John. (b) .....                                                               | 111 |
| Figura 17 – Dendograma de ordenação dos 23 depósitos de rejeito e estéreis da mineração de carvão e das 04 áreas sem contaminação (testemunhas) da bacia carbonífera de Santa Catarina ..... | 134 |
| Quadro 2 – Descrição das áreas de estudo na região carbonífera de Santa Catarina .....                                                                                                       | 113 |

## **LISTA DE TABELAS**

### **Artigo II**

|                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Valores certificados e recuperados dos elementos-traço da amostra referência NIST SEM 2709 San Joaquine e Limite de detecção e quantificação operacionais, LDO e LQO, respectivamente .....                | 117 |
| Tabela 2 – Caracterização do rejeito e estéril da mineração de carvão nos 23 depósitos e caracterização do solo nas 04 áreas sem contaminação (testemunhas), da Bacia Carbonífera Catarinense. Média dos valores..... | 120 |
| Tabela 3 – Teores de elementos-traço no rejeito e estéril da mineração de carvão e no solo das áreas sem contaminação, da Bacia Carbonífera Catarinense.....                                                          | 127 |



## SUMÁRIO

|                                                                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>                                                                                                              | <b>23</b> |
| <b>2 HIPÓTESES .....</b>                                                                                                                     | <b>27</b> |
| <b>3 OBJETIVOS .....</b>                                                                                                                     | <b>29</b> |
| 3.1 OBJETIVO GERAL .....                                                                                                                     | 29        |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                                                              | 29        |
| <b>4 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                                                                                          | <b>31</b> |
| 4.1 CARVÃO MINERAL.....                                                                                                                      | 31        |
| <b>4.1.1 Carvão mineral.....</b>                                                                                                             | <b>31</b> |
| <b>4.1.2 Processos de produção do carvão mineral .....</b>                                                                                   | <b>34</b> |
| 4.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO ...                                                                                           | 36        |
| <b>4.2.1 Drenagem ácida de mina (DAM) e a disponibilidade de<br/>elementos-traço .....</b>                                                   | <b>36</b> |
| 4.3 SAMAMBAIAS E LICÓFITAS NOS DEPÓSITOS DE REJEITO E<br>ESTÉREIS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO .....                                               | 45        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                     | <b>49</b> |
| <b>5 CAPÍTULO I – SAMAMBAIAS E LICÓFITAS PRESENTES<br/>NOS DEPÓSITOS DE REJEITO E ESTÉREIS DE CARVÃO EM<br/>SANTA CATARINA, BRASIL .....</b> | <b>65</b> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                                                          | <b>65</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                                                        | <b>66</b> |
| 5.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                                         | 67        |
| 5.2 MATERIAL E MÉTODOS .....                                                                                                                 | 69        |
| <b>5.2.1 Área de estudo .....</b>                                                                                                            | <b>69</b> |
| <b>5.2.2 Coleta e caracterização das samambaias e licófitas .....</b>                                                                        | <b>75</b> |

|                                                                                                                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                                                                                                          | 76         |
| 5.4 CONCLUSÃO .....                                                                                                                                                                       | 92         |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                                                                                                   | <b>94</b>  |
| <b>6 CAPÍTULO II – RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE SAMAMBAIAS E LICÓFITAS E O TEOR DE ELEMENTOS-TRAÇO EM ÁREAS DE BOTA-FORA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO EM SANTA CATARINA, SUL DO BRASIL .....</b> | <b>101</b> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                                                                                                       | <b>101</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                                                                                                                      | <b>103</b> |
| 6.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                                                                                      | 105        |
| 6.2 MATERIAL E MÉTODOS .....                                                                                                                                                              | 106        |
| 6.2.1 Área de estudo .....                                                                                                                                                                | 106        |
| 6.2.2 Características gerais da área de estudo .....                                                                                                                                      | 111        |
| 6.2.3 Amostragem e análise das amostras .....                                                                                                                                             | 113        |
| 6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                                                                                                          | 118        |
| 6.3.1 Caracterização química do rejeito e estéril.....                                                                                                                                    | 118        |
| 6.3.2 Teores de elementos-traço no rejeito e estéril.....                                                                                                                                 | 125        |
| 6.3.3 Relação entre depósitos e a presença/ausência de espécies de samambaias e licófitas.....                                                                                            | 133        |
| 6.4 CONCLUSÃO .....                                                                                                                                                                       | 138        |
| <b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                                                                                                                                       | <b>141</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                                                                                                   | <b>143</b> |

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O carvão mineral é um combustível fóssil, constituído por uma estrutura heterogênea e complexa formada por materiais orgânicos e inorgânicos. Fornece cerca de 30% da energia primária, 41% da eletricidade e 68% do aço produzido e consumido do mundo, sendo considerado um importante recurso energético, pois além de garantir o desenvolvimento social e econômico da região de exploração, ainda é considerado um fator estratégico para a segurança energética nacional (ABCM, 2013).

No país, o principal uso do carvão mineral é para geração de energia elétrica, porém este ainda é pequeno, ocupando o sexto lugar em termos de produção de eletricidade, à frente apenas da energia eólica (MME; ANEEL, 2009). Entretanto, com a atual crise energética, o aumento dos preços de outros combustíveis fósseis (gás natural e petróleo) e o desenvolvimento de técnicas de “queima limpa” para os carvões de baixa qualidade, há um aumento das perspectivas de expansão do setor de termelétricas a carvão (AMARAL-FILHO, 2009).

De acordo com dados apresentados no Relatório Síntese Ano Base 2013 da Empresa de Pesquisa Energética, esse aumento já começa a ser notado. Em 2013, houve um crescimento de 3,6% no consumo final nos setores residencial e comercial de eletricidade, em relação ao ano de 2012, destacando as usinas termelétricas movidas a carvão mineral, que participaram com 75% da produção de energia. Com isso, o carvão mineral registrou um crescimento na participação da matriz elétrica nacional de 1,6% no ano de 2012 para 2,6% no ano de 2013, evidenciando sua importância (MME/ANEEL, 2014).

As maiores jazidas de carvão mineral se concentram na região sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, responsáveis por reservas de 28,8 bilhões, 3,4 bilhões e

100 milhões de toneladas, respectivamente (NASCIMENTO et al., 2002). Dessas, a região da Bacia Carbonífera Catarinense, é uma das mais importantes em termos de extração, e situa-se entre a Serra Geral a Oeste e o maciço granítico da Serra do Mar a Leste (NICOLEITE, 2013), com aproximadamente 70 km de comprimento por 15-20 km de largura (DNPM, 2009). Essa região engloba os municípios integrantes da Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC) que tem sua história de desenvolvimento econômico e social atrelada à extração do carvão, atividade que possibilitou o aparecimento de outros setores industriais como a indústria cerâmica, plástica e a química (PETERSON, 2008).

Contudo, essa atividade provocou profundas e intensas transformações ao meio ambiente, resultando em um balanço negativo entre o desenvolvimento econômico e a degradação ambiental. Isso aconteceu devido a uma série de fatores que incluem à baixa qualidade do carvão extraível, que possui altos teores de cinzas (50%) e enxofre (2%) gerando grandes quantidades de resíduos sólidos bem como efluentes ácidos (NASCIMENTO et al., 2002), o pouco conhecimento, na época, das sérias implicações que a prática da atividade sem controle poderia causar ao meio ambiente e a necessidade de beneficiamento do carvão ROM (*Run-of-Mine*), sendo este juntamente com outros processos produtivos, fatores prejudiciais, pois acarretaram a disposição inadequada de resíduos sólidos (estéreis e rejeito), formando vultuosos depósitos a céu aberto que ocasionaram a formação do processo de drenagem ácida de mina (DAM).

A DAM é um fenômeno resultante da exposição de resíduos sólidos contendo minerais sulfetados, principalmente a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que quando expostos ao ar e a água sofrem oxidação, tendo como produto final uma solução ácida que age como agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo produzindo um percolado rico em elementos traços dissolvidos (As, Cd, Cr, Pb, Ni, Fe, Al, Mn, Zn) e ácido sulfúrico. Essa

solução acarreta na contaminação dos corpos hídricos e do solo, tornando-os impróprios para o uso mesmo depois de cessadas as atividades de mineração (FOSSATTI et al., 2011), levando ao desaparecimento da flora e fauna local. Os efeitos da DAM são evidenciados até os dias atuais, representando um dos maiores problemas na mineração de carvão.

Em virtude das extensas áreas degradadas pela atividade carbonífera e da importância econômica do carvão, inúmeros esforços tem sido direcionados no intuito de recuperar essas áreas e os recursos naturais atingidos, sendo que, em 2012, o Ministério Público Federal (MPF) obrigou os responsáveis pelos passivos ambientais a elaborar e executar um Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), que abrangeu todos os depósitos e áreas de mineração a céu aberto da Bacia Carbonífera Catarinense (BRASIL, 2012).

No entanto, atualmente, grande parte da zona rural da região carbonífera encontra-se descaracterizada, sendo ainda formada por imensos depósitos de rejeitos e estéreis. Nesses locais a vegetação encontra-se alterada em relação as suas características originais, sendo constituída em sua maioria por espécies exóticas introduzidas como *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D. Webster e *Eucalyptus* spp. (NICOLEITE, 2013), ou ainda em muitas áreas a vegetação é inexistente.

Porém, apesar da intensa degradação ambiental e da perda do padrão biótico anterior (CITADINI-ZANETT, 2000), ainda é possível se encontrar no entorno dos depósitos remanescentes florestais com certa diversidade específica, que abrigam espécies que colonizavam as áreas antes da formação dos depósitos de rejeito e estéreis. Entre essas espécies, está o grupo das samambaias e licófitas, sendo que algumas espécies se destacam por serem resistentes a ambientes degradados, pois apresentam rusticidade, sendo pouco exigentes em fertilidade do solo e sobreviverem a longos períodos de estiagem (MORAN, 2008; PRADO; SYLVESTRE, 2010). Além disso, são plantas nativas da região e pioneiras na escala de sucessão



ecológica podendo restabelecer estruturas e funções ecológicas que havia no ecossistema antes da degradação (AUMOND, 2003).

Assim sendo, as espécies de pteridófitas encontradas nos remanescentes e no interior dos depósitos de rejeito e estéreis poderiam ser uma alternativa de recolonização desses locais, integrando projetos de recuperação/reabilitação e monitoramento de áreas impactadas pela atividade carbonífera.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi fornecer informações a respeito da caracterização química e do teor total de elementos-traço (Cd, Pb, Ni, Zn) no rejeito e estéreis de 23 depósitos da Bacia Carbonífera Catarinense e realizar um levantamento das espécies de samambaias e licófitas que ocorrem naturalmente nesses depósitos, avaliando seu possível potencial na colonização das áreas degradadas pela mineração de carvão.

## **2 HIPÓTESES**

- O rejeito e o estéril dos depósitos da mineração de carvão contêm elementos traços.
- As espécies de samambaias e licófitas que ocorrem espontaneamente nos depósitos de rejeito e estéril da mineração de carvão são pioneiras na revegetação desses ambientes.



### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a relação entre a presença de samambaias e licófitas e o teor de elementos-traço em áreas de bota-fora de mineração de carvão em Santa Catarina.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar um levantamento das espécies de samambaias e licófitas que ocorrem em áreas de bota-fora da mineração de carvão.

Efetuar observações para cada espécie referentes a ambientes preferencias, formas biológicas e adaptações ambientais.

Efetuar a caracterização química e do teor total de elementos-traço (Cd, Pb, Ni, Zn) no rejeito e estéreis nos depósitos da mineração de carvão;

Relacionar a presença de samambaias e licófitas e o teor de elementos-traço do substrato.

Avaliar o potencial do uso das espécies de samambaias e licófitas na revetação dessas áreas



## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 MINERAÇÃO DE CARVÃO**

#### **4.1.1 Carvão mineral**

A descoberta do carvão mineral no Brasil ocorreu no final do século XVIII na localidade de Curral Alto no Rio Grande do Sul onde, entre os anos 1855 e 1963 iniciou-se a mineração nos municípios de Arroio dos Ratos, Candiota e Hulha Negra, tendo como principal mercado as fábricas e as charqueadas da região. Em Santa Catarina, o combustível fóssil foi identificado pela primeira vez no ano de 1827, na localidade de Guatá, onde hoje se localiza o município de Lauro Müller, sendo inicialmente explorado por uma empresa inglesa que construiu uma ferrovia ligando Lauro Müller ao porto de Laguna. (FRANCO; MARIMON, 2008; CETEM, 2014). Mesmo com a descoberta, somente a partir das I e II Guerras Mundiais é que a indústria do carvão ganhou força no Brasil, tendo seu ápice na década de 1970, devido à crise mundial do petróleo (MONTEIRO, 2004).

O carvão mineral é uma rocha combustível originada de raízes, troncos, galhos e folhas de árvores que permaneceram submersas em ambiente pantanoso, por milhões de anos. Contém elevados teores de carbono (50% a 95%), formados pela preservação de matéria vegetal por compactação, variação de temperatura e pressão. Ocorre geralmente em camadas estratificadas, que vão de poucos centímetros a centenas de metros de espessura, e sua cor varia do marrom ao preto (MONTEIRO, 2004).

Pode ocorrer de forma autóctone, quando formado no próprio local de deposição da matéria orgânica, ou alóctone, quando a matéria orgânica sofreu transporte até a bacia de deposição (MACHADO, 2007). Geralmente, é encontrado em regiões de clima frio ou temperado, tendo sua distribuição espacial considerada vantajosa frente a outros minerais fósseis energéticos, podendo ser encontrado em todos os continentes (DNPM, 2009).

Segundo Silva (1990), seus principais constituintes são o carbono, o oxigênio e o hidrogênio, permitindo classificar o carvão de acordo com sua qualidade em quatro tipos: turfa (com cerca de 60% de carbono), o linhito (70% de carbono), hulha ou carvão betuminoso (80 a 85% de carbono) e antracito (90% de carbono). Nesta ordem, aumenta também seu *rank* (grau de carbonificação) e diminui a concentração de hidrogênio, quanto mais alto o *rank* melhor a qualidade do carvão. Esse índice é dependente, da intensidade, da pressão e da temperatura a que a camada de matéria vegetal (originária do carvão) foi submetida além do tempo de duração do processo (CETEM, 2001).

Outro índice qualitativo do carvão, segundo Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005), é a capacidade de produção de calor – ou poder calorífico, expresso em kcal/kg (kilocaloria obtida por quilo do combustível), que é favorecido pela incidência de carbono e prejudicado pela quantidade de impurezas (elementos rochosos e minerais). No carvão mineral, o poder calorífico e a incidência de impurezas variam o que determina a subdivisão do minério nas categorias: baixa qualidade (linhito e sub-betuminoso) e alta qualidade (ou hulha, subdividida nos tipos betuminosos e antracito) (MONTEIRO, 2004).

Além dos constituintes citados acima, o carvão mineral é formado ainda por materiais orgânicos denominados macerais (similares aos minerais de rochas ígneas) e inorgânicos formados por diversos tipos de rochas e minerais.

Mesmo com as variações de local e mesmo de uma camada para outra, certos minerais como os aluminossilicatos (argilo-minerais) silicatos, carbonatos, sulfetos e sulfatos estão presentes em praticamente todos os carvões (TORREY, 1978).

Associados aos constituintes do carvão encontram-se vários elementos traços, cuja ocorrência é estudada por inúmeros autores, como Coleman e Bragg (1990); Dai et al. (2005, 2012); Borges (2005); Seredin e Filkman (2008), entre outros. Breger (1958), menciona que tais elementos teriam sido concentrados nos carvões em dois estágios: o primeiro na acumulação de elementos como resultado da atividade de alguns organismos, ainda em seu ciclo de vida (C, N, P, S, Fe, Ca, Ba, Mn, I, Cu, V e Zn); e o segundo na acumulação após a morte dos organismos por: a) via mecânica, por meio de animais e fragmentos de rochas que se depositaram durante a formação do carvão (Si, Al, Ca, Mg, Fe, Mn, Na, K, entre outros); b) via química, a partir da precipitação de sulfetos (Fe, Cu, Pb, Zn), ou por produtos de oxidação (Ag); c) via adsorção física (V, Ag, Th, U). Assim, o ambiente de formação de cada reserva de carvão é fator determinante das características e possíveis aplicações do mesmo.

No Brasil, as jazidas de carvão localizam-se principalmente nos estados do RS, SC e PR, onde há milhões de anos, no período Permiano da Era Paleozóica (240 e 280 milhões) havia ali ambientes costeiros com deltas, lagunas e um clima sazonal temperado, sendo que as camadas sedimentares se depositaram numa grande área deprimida hoje chamada Bacia Sedimentar do Paraná (MONTEIRO, 2004).

Os pântanos costeiros estavam sujeitos ao avanço de dunas litorâneas e da água do mar, rica em sais dissolvidos. Formou-se, assim, um carvão com alto teor de cinzas, enxofre e ferro, disseminados na forma de um mineral chamado pirita. Tais características conferiram ao carvão brasileiro um alto conteúdo de impurezas (teor de cinzas em torno de 40 e 55% e



de enxofre geralmente entre 1 e 2,5%, chegando a 5,5% e um baixo poder calorífico (normalmente entre 3.000 e 4.500 cal/g (MONTEIRO, 2004). Os carvões brasileiros classificam-se em betuminoso (carvões lustrosos, de cor negra ou cinza escura, de alta qualidade e conhecidos também como. hulhas graxas ou carvão betuminoso) e sub-betuminoso (carvões combustíveis, mas com valor calorífico inferior ao do carvão betuminoso; ricos em hidrogênio e de sua destilação se obtém óleo); a maior parte do carvão rio-grandense é do tipo betuminoso alto volátil C, enquanto o carvão catarinense é do tipo betuminoso alto volátil A, considerado de melhor qualidade (FRANCO; MARINON,2008).Atualmente, a principal aplicação do carvão mineral em Santa Catarina é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas, que empregam 80% da mão de obra nacional para o segmento, um aumento de 2% em relação ao número de empregados em 2012, proporcionando desenvolvimento social e econômico na região (ABCM, 2014).

#### **4.1.2 Processo de produção do carvão mineral**

A produção do carvão mineral ocorre resumidamente, por meio de três processos distintos sendo eles a extração, o beneficiamento e a combustão. Na Bacia Carbonífera Catarinense, o primeiro processo, a extração acontece atualmente, segundo dados do Sindicato das Indústrias de Extração de Carvão de Santa Catarina (SIECESC), em 12 minas subterrâneas, localizadas nos municípios de Criciúma, Forquilha, Siderópolis, Lauro Muller, Treviso, Içara, Urussanga, entre outros (CETEM, 2014).

Contudo, o mesmo pode ser realizado de duas formas distintas, a mineração subterrânea ou a mineração a céu aberto, sendo que a escolha irá depender da profundidade em que está a camada de carvão e das condições de trabalho da área.

A mineração subterrânea implica em abertura de poços, planos inclinados, ou galerias de encosta, para extração do

minério, transporte de materiais e de pessoal. O método de câmaras e pilares é o mais utilizado no Brasil e consiste na abertura de um eixo principal de transporte, constituído de duas ou mais galerias paralelas e perpendiculares; a este são traçados os painéis de produção, onde são abertas galerias de produção (DNPM, 1987).

A lavra a céu aberto é possível quando o carvão está próximo à superfície, consistindo na remoção do solo superficial ou formações sedimentares que recobrem as camadas de carvão permitindo o acesso ao minério. O método de lavra em tiras é frequentemente empregado (TORREZANI; OLIVEIRA, 2013).

Em seguida, o carvão passa pelo processo de beneficiamento, realizado por meio da britagem e lavagem, visando à redução do teor de matéria inorgânica (argila – formadora de cinzas) e do enxofre (pirita) tóxico ao ambiente. Esse processo, geralmente ocorre por meio de equipamentos que utilizam o princípio da diferença de densidades entre a matéria orgânica (menor densidade) e o rejeito utilizando para isto a água, que após é filtrada ou espessada e parcialmente reaproveitada (SAMPAIO, 2002).

Por fim tem-se a combustão que corresponde à queima do carvão mineral, usado principalmente para produção de energia elétrica nas termoelétricas, aquecimento de fornos de siderúrgicas, na indústria química (produção de corantes), fabricação de explosivos, plásticos, medicamentos, fertilizantes, inseticidas, entre outros (SAMPAIO, 2002).

Apesar dos ganhos econômicos e sociais que a mineração trouxe para a região sul de Santa Catarina, os processos produtivos causaram sérios danos ambientais e deixaram um rastro de devastação que pode ser observado até os dias atuais. Esses danos derivam de todas as etapas do processo que promoveram a alteração dos perfis topográficos pela remoção das camadas de carvão, perda da vegetação e da

microfauna natural (FRANCO; MARIMON 2008), geração de rejeitos sólidos criando extensos depósitos a céu aberto conduzindo a geração da drenagem ácida de mina (DAM) que por sua vez aumenta a concentração de contaminantes e poluentes tanto em sub-superfície, solo, sedimento e rochas como nas águas subterrâneas (CETESB, 2001; SILVA, 2010) além do lançamento de gases tóxicos e cinzas lixiviadas e transportadas pelo vento ou pela erosão hídrica contaminando o solo e os recursos hídricos do entorno (ALLOWAY; AYRES, 1996; BENITO et al., 2001). Todos esses prejuízos romperam as relações do ecossistema e levaram a transformação da paisagem como um todo.

Mesmo com a atual modernização das atividades de mineração aliadas às obrigatoriedades legais no sentido de atenuar ou evitar a degradação, bem como promover a recuperação das áreas afetadas, existem ainda muitos locais degradados. Isso evidencia a necessidade da pesquisa na busca por técnicas cada vez mais eficientes na recuperação dos depósitos já formados bem como em todas as etapas do processo produtivo visando encontrar medidas eficientes que aliem a exploração do carvão com a preservação do meio ambiente.

## 4.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO

### 4.2.1 Drenagem ácida de mina (DAM) e a disponibilidade de elementos-traço

Em 1980 com o Decreto Federal nº 85.206/80, a região carbonífera de Santa Catarina foi decretada como sendo a 14ª Área Crítica Nacional para Efeitos de Controle da Poluição e Conservação da Qualidade Ambiental (BRASIL, 1980), sendo que na época já havia cerca de 4.700 hectares de áreas degradadas pela mineração de carvão (JICA, 1998). Com a

homologação do decreto, as áreas degradadas pela atividade carbonífera receberiam assistência federal especial para a reparação dos danos ambientais. Porém, no ano de 2009, segundo dados do Grupo Técnico de Assessoramento (GTA), as áreas afetadas já haviam atingindo 6. 341 hectares e os recursos hídricos impactados pela DAM já totalizavam 8,9% da Bacia do Rio Araranguá, 14,1% da Bacia do Rio Urussanga e 3,1% da Bacia do Rio Tubarão, alterando a qualidade da água e a integridade da fauna e flora (GTA, 2007).

As camadas mineradas em Santa Catarina são predominantemente a Barro Branco e a Bonito, que apresentam teores de pirita, no rejeito do carvão, variando entre 10 a 12% e entre 12 e 17%, respectivamente. Os materiais, de ambas as camadas, enquadram-se, em termos de periculosidade conforme a NBR 10004/2004, como *Resíduo Não Perigoso do Tipo Não Inerte – Classe II A*. Entretanto, apresentam um alto potencial de geração de acidez, com valores de “potencial de neutralização líquido” (NNP) da ordem de -250 a -350 kg de  $\text{CaCO}_3/\text{t}$  (Empresas Rio Deserto, 2004 apud VIGANICO, 2010).

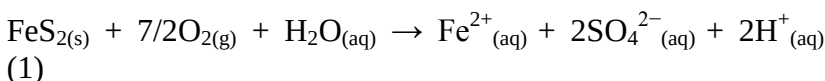
Em virtude da quantidade de resíduos existentes, o carvão ROM (*Run-of-Mine ou minério bruto*), precisa ser beneficiado, o que gera o descarte de cerca de 40 a 70% de resíduo. Os resíduos gerados no processo de mineração do carvão são classificados em dois tipos: os *estéreis* produzidos no decapeamento da jazida, compostos pelos materiais de cobertura, camadas intermediárias ou circundantes do material de interesse extraído fisicamente pelo uso de explosivos ou escavadeiras, que não possuem valor econômico e os *rejeitos* propriamente ditos, compostos por resíduos sólidos resultantes das operações de beneficiamento e metalurgia extrativa, contêm elevado grau de toxicidade, além de partículas dissolvidas e em suspensão, elementos-traço e reagentes. Ambos quando dispostos inadequadamente provocam graves

problemas ambientais, sendo que o mais conhecido é a drenagem ácida de mina que leva a degradação dos recursos hídricos, solo e ar (BORMA; SOARES, 2002).

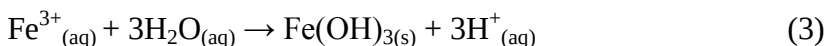
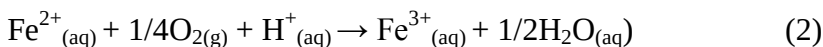
Confirmando esse fato, dados de um levantamento realizado pelo Sindicato das Indústrias de Extração de Carvão Mineral do Estado de Santa Catarina (SIECESC, 2009) apontaram que a produção de rejeitos acumulada no Brasil atingiu 300 milhões de toneladas entre os anos de 1925 a 2007, sendo responsável pela geração diária de 300.000 m<sup>3</sup> de drenagens ácidas, considerada até os dias atuais o principal impacto ambiental da atividade carbonífera.

A DAM origina-se com a retirada de rochas que contêm minerais sulfetados como a pirita (FeS<sub>2</sub>) – estáveis e insolúveis - do interior da terra e consequente exposição a superfície reagindo com a água e o ar atmosférico, oxidando-se, tendo como produto desta reação soluções ácidas que podem solubilizar uma gama de elementos químicos inviabilizando as águas subterrâneas e superficiais, o solo e dizimando a vegetação local (MELLO et al., 2014).

Segundo Kontopoulou (1998), após a exposição atmosférica, o processo de DAM compreende uma série de reações químicas complexas que envolvem mecanismos diretos, indiretos e ação microbiana. Algumas reações de oxidação resultam a geração de ácido, enquanto outras resultam a dissolução e mobilização de elementos traços. Esse conjunto de reações geradoras da drenagem ácida de mina podem ser explicadas por meio de duas propostas, pela ótica de Mello et al. (2014). A primeira considera que o processo se inicia com a oxidação da pirita pelo contato com o ar e água gerando a dissolução de ferro, sulfato e hidrogênio, em meio abiótico e com pH que varia de 4,5 até próximo a neutralidade (equação 1):

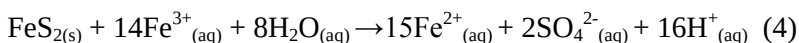


Posteriormente, ocorre a oxidação do íon  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$  (Equação 2) que através da hidrólise, produz hidróxido férrico liberando prótons que tornam o meio ácido (Equação 3) (SINGER; STUMM, 1970):



Com a queda do pH para valores menores que 3,5 a oxidação do íon férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (equação 3) na presença de oxigênio, passa a ser muito baixa. Contudo, o processo pode ser acelerado pela ação de bactérias acidófilas do gênero *Thiobacillus* que catalisam a reação. Esse grupo de bactérias, torna-se ativo em pH 1,4 a 4,0 e temperaturas entre 5 e 35 °C, porém seu desenvolvimento ótimo ocorre em pH 2 a 3 e temperatura entre 30 e 35 °C. Três espécies de *Thiobacillus* comumente ocorrem nesses ambientes: *T. ferrooxidans*, que oxida o Fe (II) e pirita tão bem quanto o enxofre, *T. thiooxidans*, que oxida apenas formas de enxofre e pirita, e a *T. acidophilus* que é um autotrófico facultativo que oxida formas de enxofre, mas não o Fe (II) (KONTOPOULOS, 1998).

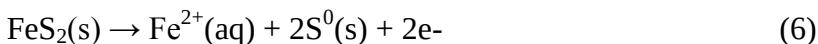
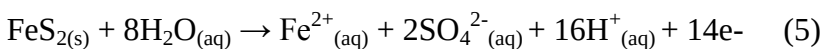
Assim, com o aumento da concentração de  $\text{Fe}^{3+}$  no meio, e a diminuição da hidrólise, o íon  $\text{Fe}^{3+}$  passa a oxidar a pirita, sendo reduzido a  $\text{Fe}^{2+}$ , que novamente pode entrar no ciclo de geração ácida (Equação 4). Esse processo torna-se contínuo e capaz de acelerar as reações e gerar grandes quantidades de acidez.



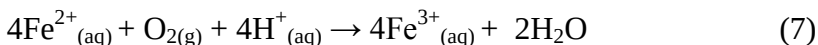
As etapas desse processo, resultam na produção de uma água ácida com pH menor que 2,5 com elevadas concentrações

de sulfato, ferro total e metais dissolvidos e em suspensão, tais como, alumínio, zinco, manganês entre outros (VIGANICO, 2010), em concentrações superiores às aquelas normalmente encontradas em ambientes naturais. Contudo, as características e concentrações irão variar de acordo com as propriedades de cada depósito que envolvem a composição mineralógica das rochas e do minério no sítio da mineração (NORDSTROM et al., 2000; WORRAL e PEARSON et al., 2001; MELLO et al., 2014).

A segunda proposta para a explicação do fenômeno da geração de DAM, segundo Mello et al. (2014), sugere que a oxidação da pirita pode ocorrer também na ausência de oxigênio por duas vias, que dependerá do potencial eletroquímico da reação. Na via representada pela equação 5, a oxidação da pirita ocorre na ausência de  $O_2$  e produz  $SO_4^{2-}$  e na via representada pela equação 6 inicia-se a semirreação de oxidação da pirita pelo processo eletroquímico com produção de  $S^0$ .



A continuidade das semirreações podem ser visualizadas nas equações 7 e 8 indicando que apesar do controle da semirreação de redução 7 ser determinado pela concentração de  $O_2$ , os principais passos determinantes da velocidade de reação não envolvem  $O_2$ .



Na primeira proposta (Equação 1) tem-se uma relação entre  $SO_4^{2-}$  e  $H^+$  de 1:1, ao passo que na segunda (Equação 8),

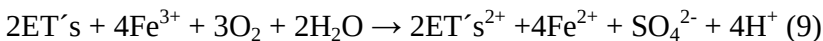
essa relação é 1:8. Essa análise detalhada do processo de DAM permite identificar o mecanismo dominante e o nível de agressividade da reação que pode apresentar diferenças nos depósitos, além de contribuir para ações práticas de controle da drenagem ácida.

Além da geração de acidez e da presença de metais tóxicos como o Al, Fe, Mn e S, a DAM leva a dissolução de minerais e mobilização de elementos como o Ca, Mg e K que são perdidos por lixiviação devido sua associação com o ânion  $\text{SO}_4^{2-}$  proveniente da oxidação da pirita, bem como de elementos traços As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Hg, entre outros, considerados nocivos ao ambiente em concentrações elevadas alterando a qualidade química do meio (MUNIZ, 2009). A composição, a concentração e a disponibilidade dos elementos traços dependem de muitos fatores, dentre eles a mineralogia, o comportamento geoquímico (ROBERTSON, 1994), o tipo e a quantidade do sulfeto oxidado, a temperatura, a ação de bactérias do gênero *Thiobacillus*, entre outros, específicos de cada ambiente que irão condicionar o tempo e os níveis de contaminação (MUNIZ, 2006).

No caso do carvão catarinense, que apresenta uma composição mineralógica diversificada contendo uma gama de minerais sulfetos como a pirita, a marcassita, a pirrotita ( $\text{FeS}$ ), a arsenopirita ( $\text{AsFeS}$ ) e calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) (MARCELLO et al., 2008; LATTUADA et al., 2009; GALATTO et al., 2009; SILVA et al., 2009) e ainda minerais secundários, formados a partir do processo de DAM, como a jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) e a schwertmannita que podem assimilar dentro de suas estruturas elementos como Pb, As e Cr (SIMONA et al., 2004; STOFFREGEN et al., 2000), a dissolução deve-se à ação dos íons  $\text{H}^+$  aliada ao caráter oxidante do Fe (III), que poderá ocorrer com produção de acidez de acordo com a equação 9 (MILLS, 1995; LAPAKO,

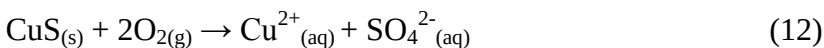
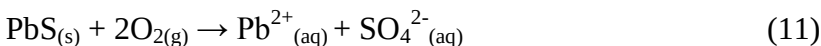
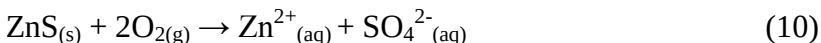


2002) mobilizando os elementos traços contidos nas estruturas minerais.



Além disso, a pirita, mineral abundante nos rejeito do carvão catarinense, tem influencia direta nas concentrações de todos os elementos tóxicos do rejeito incluindo o enxofre, podendo absorvê-los em sua superfície naturalmente, sendo considerada um reservatório de elementos traços (AL et al., 1997; FARFAN e BARBOSA FILHO, 2004; CUTRUNEO et al., 2014), disponibilizando por meio do processo de DAM elementos traços potencialmente causadores da contaminação no solo, na água e no ar.

Contudo, existem ainda minerais sulfetados presentes no carvão mineral como a galena (PbS), a esfalerita (ZnS) e a calcocita (CuS) que não sofrem hidrólise ácida (equações 10, 11, 12), mas que liberam os elementos traços presentes em sua estrutura cristalina devido a alterações provocadas pela oxidação da pirita no equilíbrio químico do meio (MELLO et al., 2003).



A disponibilidade dos elementos-traço, também depende da geoquímica dos mesmos em condições de drenagens ácidas, onde o pH é baixo, sendo que a maioria deles como o Cd, Cu, Ba, Sr, Ni e Zn formam, ligações eletrostáticas com minerais de argila e matéria orgânica, tendo suas formas trocáveis e solúveis favorecidas o que pode ocasionar perdas por lixiviação. Porém, nestes ambientes há formação de óxidos

de Fe, Mn e Al que podem adsorvê-los especificamente tornando-os insolúveis (McBRIDE, 1994). Em contrapartida outros elementos traço como o Pb, Cr, As, Se e Co por exemplo, são menos móveis podendo ser complexados pela matéria orgânica, quimiossorvidos em óxidos e minerais silicatados e precipitados como carbonatos, hidróxidos ou fosfatos (McBRIDE, 1994), tornando-se abundantes e tóxicos no carvão (FINKELMAN, 1994; BORGES et al., 2006; SILVA et al., 2010).

Ademais, a interação de fatores como a temperatura, precipitação pluviométrica, ação de bactérias do gênero *Thiobacillus*, tempo de exposição das pilhas de rejeito-piritoso, presença de minerais carbonosos entre outros, têm influência direta nas reações de produção da drenagem ácida e consequentemente na disponibilização dos elementos traço (MELLO et al., 2014).

Depois de gerada, a DAM tem seu potencial hídrico poluidor aumentado por ser um efluente de baixo pH e rico em metais como o Fe, Al e elementos-traço podendo disseminar-se facilmente através da percolação ou lixiviação pelas pilhas de rejeito-piritosos atingindo o subsolo, os reservatórios de águas subterrâneas e os mananciais existentes no entorno, provocando um grande número de reações e fenômenos físico-químicos em série que envolvem desde a precipitação e deposição de hidróxidos metálicos ao longo do caminho do fluxo das águas percoladas, adsorção ou bioacumulação de elementos traço até a precipitação de sulfetos insolúveis (FÉRIS, 2001), inviabilizando o uso do solo e da água e, por conseguinte, extinguindo a flora e fauna local. Não obstante, os graves impactos ambientais provocados podem ter continuidade durante dezenas de anos ou séculos, nas minas a céu aberto, subterrâneas ou em depósitos de rejeito causando problemas em larga escala (NORDSTROM; ALPERS, 1999; BORMA; SOARES, 2002; NASCIMENTO et al., 2002;

SOARES; TRINDADE, 2004; WORL COAL INSTITUTE, 2005; NIETO et al., 2007; AMARAL-FILHO, 2009).

Todos esses elementos e suas interações tornam complexa a tarefa de recuperação/reabilitação dos depósitos como a recuperação dos recursos hídricos para promover o recuo da pluma de poluição. Mesmo assim, medidas preventivas e recuperativas vêm sendo tomadas visando obrigar os responsáveis pelos passivos ambientais a mitigar e recuperar as áreas degradadas, após a mineração. Para isso, o MPF determinou que cada área deverá passar por processos de recuperação/reabilitação, sendo para isso, objeto de um Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) específico, obedecendo às normas do PRAD padrão judicialmente homologadas. Os PRAD's compõem a Bacia Carbonífera do Sul do Estado e contemplam as áreas de depósitos de rejeitos, áreas mineradas a céu aberto e minas abandonadas, bem como o desassoreamento, fixação de barrancos, descontaminação e retificação dos cursos d'água, além de outras obras que visem amenizar os danos sofridos principalmente pela população dos municípios-sede da extração e do beneficiamento do carvão mineral (BRASIL, 2012).

Nesse contexto, muitas pesquisas na área vêm sendo desenvolvidas tanto para elucidar a atual situação das áreas já impactadas pela atividade carbonífera, fornecendo informações científicas na busca pelo controle da poluição bem como pesquisas que visam formas e processos de tratamentos dos resíduos e a modernização dos processos envolvidos na mineração do carvão buscando mitigar e até mesmo evitar a degradação ambiental causada pela atividade.

Apesar dos esforços demandados o processo de recuperação/reabilitação dessas áreas é um desafio técnico, pois existem inúmeras barreiras bióticas e abióticas que dificultam o procedimento (SILVA, 2009), sendo o mesmo de suma importância, assim como a exploração e utilização

conscientes do carvão como propulsor do desenvolvimento social e econômico da região.

### 4.3 SAMAMBAIAS E LICÓFITAS NOS DEPÓSITOS DE REJEITO E ESTÉREIS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO

A vegetação do estado de Santa Catarina pertence ao Bioma Mata Atlântica, incluindo diversas fitofisionomias florestais, campos de altitude e ecossistemas associados (RAMOS, 2007). Até o início do século passado, apenas 5% desse bioma, havia sido destruído, mas de acordo com dados da Fundação SOS Mata Atlântica e do INPE (2012), atualmente, restam apenas 12,5% da formação original. No sul do estado de SC, onde se concentram as atividades mineradoras de carvão, a vegetação predominante compõe a Floresta Ombrófila Densa, porém devido à degradação ambiental provocada pela agricultura, expansão das cidades e principalmente pela exploração do carvão mineral, essa vegetação está sendo suprimida (MARTINS, 2005) e substituída por imensos depósitos de rejeito e estéreis de carvão.

Essa supressão iniciou-se com as primeiras escavações em busca do carvão mineral, que na época (década de 1970), era realizada por meio de processos rudimentares, sendo que, havia pouco conhecimento a respeito do potencial contaminante e de técnicas e procedimentos para o tratamento e disposição adequada dos resíduos, resultando na formação de imensos depósitos de rejeito e estéreis. A composição desses ambientes compreende pilhas geralmente cônicas de até 20 metros de altura, onde a vegetação e o solo eram depositados na base das pilhas sobrepostos pelos estéreis (CITADINI-ZANETTE, 1999) e pelo rejeito ocasionando a perda do solo fértil e da vegetação, descaracterizando o ambiente.

Em inúmeros depósitos da região carbonífera, apesar das profundas alterações nas características bióticas e edáficas,

existem plantas que são capazes de sobreviver e se desenvolver, avançando sobre as pilhas de rejeito e de estéreis dando início ao processo de regeneração natural.

Segundo Negrelle (2003), este processo engloba fases consecutivas, as quais afetam o êxito final. A fenologia, a estratégia de polinização, sistema de cruzamento, formas de dispersão de esporos, sementes e frutos e a plasticidade das espécies são fundamentais nesse processo. Em ambientes onde ocorreram distúrbios naturais ou antrópicos, o habitat é altamente heterogêneo, abrindo caminho para diferentes espécies de plantas com capacidades diferentes de regeneração (KLEIN et al., 2009), sendo que o conhecimento destas espécies é de suma importância, pois fornece subsídios para projetos de recuperação ambiental.

Essas plantas capazes de promover e iniciar a revegetação desses ambientes são conhecidas como espécies pioneiras, tendo como características a alta taxa de disseminação, dispersão facilitada por ação do vento ou de outros fatores ambientais (rios, correntes marítimas) e a capacidade de tolerar altos níveis de radiação solar para germinar e se desenvolver. Ainda, desempenham papel fundamental no desenvolvimento de espécies intermediárias e tardias, pois durante o processo de colonização promovem transformações que possibilitam uma ordenada inserção ou mesmo a substituição de espécies que irão povoar um meio anteriormente inabitável, tornando-o propício e gradativamente mais dinâmico (GANDOLFI et al., 1995).

Dentre as espécies pioneiras está o grupo das samambaias e licófitas, conhecidas popularmente por pteridófitas. As pteridófitas possuem ampla distribuição mundial, sendo importantes componentes da flora e fundamentais para o desenvolvimento e estabelecimento de outros grupos vegetais e animais (SMITH, 1972). Desempenham uma importante função no ambiente, contribuindo com a manutenção da umidade, absorvendo água

pelas raízes densas e distribuindo-a gradualmente ao solo e ao ar, desenvolvendo a microfauna e microflora do substrato, extremamente necessárias para o equilíbrio ecológico do ambiente (BRADE, 1940; XAVIER et al., 2003). Ademais, algumas espécies, são plantas rústicas, fortemente resistentes a ambientes degradados, por serem pouco exigentes em fertilidade do solo, sobrevivem por longos períodos de estiagem e suportarem bem as adversidades ambientais (MORAN, 2008; PRADO; SYLVESTRE, 2001).

Sua presença em locais abandonados, juntamente com outras espécies pioneiras, é relatada por inúmeros autores, Citadini-Zanette (1992); Citadini-Zanette (2000); Remor (2004); Santos et al. (2008); Martins (2005); Klein et al., (2009), todos referindo-se a levantamentos e aspectos relacionados a estabilização da vegetação em áreas pós-atividade mineradora. Contudo, ainda é preciso se obter uma gama maior de informações a respeito de espécies pioneiras e remanescentes em estádios mais avançados da sucessão ecológica, que venham a corroborar na geração de subsídios para recuperação destas áreas.

Confirmando a habilidade das samambaias e licófitas de resistirem a ambientes degradados, estudos apontam que algumas espécies são hiperacumuladoras de elementos-traço, sendo capazes de absorver, translocar e tolerar altas concentrações de um determinado elemento-traço (REEVES; BACKER, 2000) sem demonstrar sintomas de toxicidade. Gonzaga et al. (2006) afirma que essas plantas parecem possuir mecanismos constitutivos e adaptativos que permitem elevada absorção e sobrevivência em solos com altas concentrações de elementos-traço.

Em trabalho realizado por Ma et al. (2001), verificaram que a espécie *Pteris vittata* L. tem a capacidade de acumular até 95% do As absorvido do solo em sua parte aérea, podendo alcançar concentrações de As em torno de 23.000  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Além

dessa, outras espécies com potencial para acumular As já foram descobertas, como a, *Pteris cretica* L. variedades *abo-lineata* e *winsettii*, *Pteris longifolia* L. e *Pteris umbrosa* R. Br. (ZHAO et al., 2002). Koller et al. (2008) e Kumari et al. (2011) concluíram que a *P. vittata*, assim como a *P. umbrosa*, possuem também a habilidade de acumular outros elementos-traço como Cu, Cr e Zn.

Ainda, Roccotiello et al. (2010) estudando a absorção de Zn por *P. vittata* e *Polypodium cambricum* L. demonstraram que ambas acumularam o elementos-traço no rizoma/raiz mas com baixa translocação. Srivastava et al. (2010), compararam a acumulação de As em 18 espécies de samambaias com a *P. vittata* e concluíram que as espécies selecionadas possuem potencial de acumular elementos-traço em suas frondes, sugerindo seu uso na remediação de solo e água contaminados com As. Singh et al. (2010), trabalhando com samambaias na Índia, demonstraram que a espécie *Adiantum capillus-veneris* L. é capaz de tolerar até 500 mg kg<sup>-1</sup> de As em sua estrutura vegetal possuindo um sistema de defesa altamente eficiente para eliminar os efeitos deletério causados pelo acúmulo do elemento- traço.

Mesmo com a gama de trabalhos existentes que demonstram a importância e o potencial desse grupo de espécies na remediação de ambientes degradados e/ou contaminados com elementos-traço, o conhecimento das espécies de samambaias e licófitas nativas da região carbonífera e sua capacidade regenerativa ainda é incipiente.

Assim sendo, observa-se a necessidade de estudos sobre este grupo de espécies bem como a elucidação dos mecanismos de resistência utilizados para habitarem os depósitos de rejeito e estéreis. Com o avanço das pesquisas será possível uma maior integração das mesmas em projetos de recuperação e monitoramento ambiental, impulsionando a reestruturação do ecossistema das áreas degradadas pela mineração de carvão.

## REFERÊNCIAS

Associação Mundial do Carvão Mineral ABCM. Carvão mineral: a encruzilhada entre realidade e ideologia. Disponível em:

<[http://www.carvaomineral.com.br/interna\\_noticias.php?i\\_cont\\_eudo=204](http://www.carvaomineral.com.br/interna_noticias.php?i_cont_eudo=204)> 2013. Acesso em: 26 de jul. de 2014.

AL, T. A.; BLOWES, D. W.; MARTIN, C. J.; CABRI, L. J.; JAMBOR, J. L. Aqueous geochemistry and analysis of pyrite surfaces in sulfide-rich mine tailings. **Acta Geochim.Cosmochim.**, v. 61, p. 2353-2366, 1997.

ALLOWAY, B.J; AYRES, D.C. Schadstoffe in der umwelt: chemische grundlagen zur beurteilung von luft, wasser – und Bodenver schmutzungen. **Spektrum Akademischer Verlag**. Heidelberg, BW. 170 p.1996.

AMARAL FILHO JR.. **Avaliação Ambiental e do Potencial de Aproveitamento de um Módulo de Rejeitos de Carvão na Região Carbonífera de Santa Catarina**. (Dissertação) Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 2009, 90p.

ANNEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. - Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.



AUMOND, J. J. Teoria dos Sistemas: uma nova abordagem para recuperação e restauração ambiental. In: Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental. Itajaí. **Anais...** Itajaí: UNIVALI, p. 10-6, 2003.

BENITO, Y.; RUIZ, M.; COSMEN, P. AND MERINO, J.L. Study of leaches obtained from the disposal of fly ash from PFBC process. **Journal of Chemical Engineering**, 84: 167-171, 2001.

BORGES, D., GALLINDO, L., FURTADO, A. S., CURTIUS, A. J., WELZ, B., & HEITMANN, U. Determination of lead in coal using direct solid sampling and high- resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry. **Microchim Acta**, 154, p. 101– 107. 2006.

BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. **Resíduos sólidos de mineração e drenagens ácidas**. In: TRINDADE, R. B. E.; BARBOSA FILHO, O. Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. CETEM/MCT, Rio de Janeiro: 344p. 2002.

BORGES, D.L.G. **Determinação de elementos traço em carvão por espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado e vaporização eletrotérmica**. (Dissertação) Mestrado em Química. Universidade do Estado de Santa Catarina – UFSC: 2005.

BRADE, A.C. Contribuição para o Estudo da Flora Pteridophyta da Serra de Baturité Estado do Ceará. **Rodriguésia**, ed.4: p. 289-314, 1940.

BRASIL. **Decreto Federal nº 85.206, de 25 de setembro de 1980**. Altera o artigo 8º do Decreto nº 76.389, de 3 de outubro de 1975, que dispõe sobre as medidas de prevenção e controle da poluição Industrial. Disponível em: <<http://www6.senado.gov.br/sicon/index.jsp#>> Acesso em: maio de 2014.

BRASIL. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. **Ação Civil Pública nº 93.8000533-4** (Processo nº 2000.72.04.002543-9), disponível em: [http://www2.prsc.mpf.gov.br/conteudo/servicos/noticias-ascom/ultimasnoticias/arq/Liminar\\_Mina101.pdf](http://www2.prsc.mpf.gov.br/conteudo/servicos/noticias-ascom/ultimasnoticias/arq/Liminar_Mina101.pdf). Acesso em 10 de julho de 2014.

BREGER, I. Geochemistry of coal. **Encontro de geologia** 53. p.823-841, 1958.

CETEM. Centro de Tecnologia Mineral. **Conceitual para Recuperação da Bacia Carbonífera Sul Catarinense**. CAMED, SIECESC, 2001. Disponível em: <<http://www.siecesc.com.br>>. Acesso em 15 jan. 2011.

CETEM. Centro de Tecnologia Mineral. **Carvão Nacional: potencial, limitações e perspectivas de aproveitamento**.

SIMEXMIN 2014 – Maio 2014. Seminário “XI – Potencial e Projetos de Minerais Estratégicos e Críticos.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: CETESB/GTZ, 389 p, 2001.

Disponível em:

<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/manual.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp)> Acesso em: dezembro de 2014.

CITADINI-ZANETTE, V. **Levantamento florístico da área de recuperação da mineração a céu aberto em Siderópolis, Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis: FATMA, 22p, 1982.

CITADINI-ZANETTE, V.; BOFF, V. P. **Levantamento florístico em áreas mineradas a céu aberto na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis : Secretaria de Estado da Tecnologia. Energia e Meio Ambiente, 160p, 1992.

CITADINI-ZANETTE, V. **Florística, fitossociologia e aspectos da dinâmica de um remanescente de mata atlântica na microbacia do Rio Novo, Orleans, SC**. (Tese) Doutorado em Ecologia. São Paulo: Universidade Federal de São Carlos, 236 p, 1995.

CITADINI-ZANETTE, V. **Diagnóstico Ambiental da Região Carbonífera no Sul de Santa Catarina: Recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão**. *Rev. Tecnologia e Ambiente*, vol. 5, n. 2, p. 51-61. 1999.

CITADINI-ZANETTE, V. Recuperação de Áreas Degradadas na Região Carbonífera de Santa Catarina: Aspectos Sucessionais e Interações Interespecíficas. In: **Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas**, ed.4. Blumenau, (SC). 2000.CD-ROM.

COLEMAN, S.L., BRAGG, L.J. Distribution and mode of occurrence of arsenic in coal. In: Chyi, L.L., Chou, C.-L. (Eds.), Recent Advances in Coal Geochemistry. **Geol. Soc. Am. Spec. Pap.** vol. 248, p. 13–26.1990.

CUTRUNEO, C.M.N.L; OLIVEIRA, M. L.S;WARD, C.R;HOWER, J.C; BRUM, I.A.S.de. SAMPAIO, C.H; KAUTZMANN, R.M; TAFFAREL, S.R; TEIXEIRA, E.C; SILVA, L.F.O.A **mineralogical and geochemical study of three Brazilian coal cleaning rejects**: Demonstration of electron beam applications International Journal of Coal Geology 130 33–52, 2014.

DAI, S., REN, D., TANG, Y., YUE, M., HAO, L. **Concentration and distribution of elements in Late Permian coals from western Guizhou Province, China.** Int. J. Coal Geol. 61, 119–137.2005.

DAI, S., REN, D., CHOU, C.-L., FINKELMAN, R.B., SEREDIN, V.V., ZHOU, Y. **Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types,**

**impacts on human health, and industrial utilization.** Int. J. Coal Geol. 94, 3–21.2012.

DNPM. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Perfil analítico do carvão.** 2 ed. Porto Alegre: 140 p 1987. (Boletim, 6).

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. CANO, T.M. **Carvão Mineral**, 2009. Disponível em: <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3970](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3970)> Acesso em: 10 jul. 2013.

FARFAN, J.R.J.Z; BARBOSA FILHO, O. **Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. Série tecnologia ambiental**, 29. CETEM/MCT, ISSN 0103-7374. Rio de Janeiro: 58p, 2004.

FÉRIS, L.A. **Aproveitamento de subprodutos do beneficiamento de carvão mineral na remoção de poluentes por sorção-flotação FAD.** (Tese) Doutorado. em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 176p, 2001.

FRANCO, V.A.C., MARIMON, C.M.P. **Tecnologias de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração de Carvão e Usos Futuros do Solo.** Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Departamento de Geografia da UDESC, 2008.

FINKELMAN, R. B. **Modes of occurrence of potentially hazardous elements in coal: Levels of confidence. Fuel Processing Technology**, v. 39, p. 21, 1994.

FOSSATTI, J.; BIZANI, D.; KAUTZMANN, R.M.; SAMPAIO, C.H. **Caracterização físico-química e comparativa de drenagem ácida (DAM) gerada em laboratório e naturalmente formada em áreas de mineração de carvão**, 2011.

GALATTO, S. L., PETERSON, M., ALEXANDRE, N. Z., DA COSTA, J. A. D., IZIDORO, G., SORATO, L., et al. **Incorporação de resíduo do tratamento de drenagem ácida em massa de cerâmica vermelha. Cerâmica**, 55, 53–60, 2009.

GANDOLFI, S et al. Estudo florístico e caráter sucessional das espécies arbustivo arbóreas de uma floresta mesófila semidecidual no município de Guarulhos, SP. **Revista Brasileira de Biologia**. São Paulo: p.55 (4) 753-767, 1995.

GTA – Grupo Técnico de Assessoramento à Execução da Sentença. **Primeiro Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais**. ACP Nº 2000.72.04.002543-9/SC. GTA: CRICIÚMA, 162p, 2007.

GONZAGA, M.L.S.; SANTOS, J.A.G.; MA, L.Q. Arsenic phytoextraction and hyperaccumulation by fern species.

**Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.63, n. 1, p. 90-101, Jan/Feb, 2006.

JICA – JapanInternationalCooperationAgency. **Estudo de viabilidade da recuperação das áreas mineradas na região sul de Santa Catarina na República Federativa do Brasil.** Japão, Relatório principal. 136p, 1998.

KLEIN, A.S.; CITADINI-ZANETTE, V.; LOPES, R.P.; SANTOS, R. dos. **Regeneração natural em área degradada pela mineração de carvão em Santa Catarina, Brasil.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(3): p.297-304, jul. set. 2009.

KOLLER, C. E.; PATRICK, J. W.; ROSE, R. J.; OFFLER, C. E.; MACFARLANE, G. R. **Arsenic and heavy metal accumulation by *Pteris vittata* L. and *P. umbrosa* R. Br. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.** Vol. 80, Issue 2, p. 128-133, 2008.

KONTOPOULOS, A. **Acid mine drainage control. In: Castro, S.H. Effluent treatment in the mining industry.** Chile: University of Concepción, p. 57-118. 1998.

KUMARI, A.; LAE, B.; PAKADE, B.; CHARD, P. Assessment of bioaccumulation of heavy metal by *pteris vittata* l. growing in the vicinity of by ash. **International Journal of Phytoremediation**, 13.779, 2011.

LAPAKO, K. Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview. Minerals, Mining and Sustainable Development (MMSD). **International Institute for Environment and Development (IIED)**. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2002.

LATTUADA, R.M.; MENEZES, C.T.B.; PAVEL, P.T.; PERALBA, M.C.R.; DOS SANTOS J.H.Z. **Determination of metals by total reflection X-ray fluorescence and evaluation of toxicity of a river impacted by coal mining in the south of Brazil**. J Hazard Mater ; p.163:531–7, 2009.

MA, L. Q.; KOMAR, K. M.; TU, C.; ZHANG, W.; CAI, Y.; KENNELLEY, E. D.; A fern that hyperaccumulates arsenic. **Nature**. p.409-579, 2001.

MACHADO, L. A. **Ensaios estatísticos e cinéticos para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas na mineração de carvão com cinzas de termoeletricas e escória de aciaria**. (Dissertação) Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais - PPGEM. Porto Alegre: 2007.

MARCELLO, R.R.; GALATOB, S.; PETERSONA, M.; RIELLAC, H.G.; BERNARDIN, A.M. **Inorganic pigments made from the recycling of coal mine drainage treatment sludge**. J Environ Manage; ed.88: p.1280–4, 2008.

MARTINS, R. **Florística, estrutura fitossociológica e interações interespecíficas de um remanescente de floresta**



**ombrófila densa como subsídio para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão, Siderópolis, SC.**  
(Dissertação) Mestrado em Biologia Vegetal. 101p. 2005.

McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soil.** New York, Oxford University Press, 406p. 1994.

MELLO, J.W.V.; DIAS, L.E.; CORREA, M.L.T. Drenagem ácida: avaliação do potencial de ocorrência, mitigação e revegetação de substratos sulfetados. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V.V.H. **Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.** v. III, p. 401-430, 2003.

MELLO, J.W.V.; DUARTE, H.A; LADEIRA, A.C.Q. Origem e controle do fenômeno drenagem ácida de mina. **Cadernos de Química Nova na Escola**, n<sup>o</sup>8, p. 24-29, 2014.

MILLS, C. **An introduction to acid rock drainage. Acid Rock Drainage at the Cordilleran Roundup seminar.** Education Committee of the Mining Association of British Columbia. Vancouver. 1995

MME/ANEEL, **Ministério das Minas e Energia, Agência Nacional de Energia Elétrica.** 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>. Acesso em: 02 de novembro de 2014.

MONTEIRO, K. V. **Carvão o combustível de ontem**. Porto Alegre : Núcleo Amigos da Terra Brasil.CDU. 622.33 : p. 504.03, 2004.

MORAN, R.C. Diversity, biogeography, and floristics. In: RANKER, T.A. & HAUFLE, C.H. (eds.). **Biology and evolution of ferns and lycophytes**. Cambridge University Press, New York. p. 367-394, 2008.

MUNIZ, D.H.F. de e OLIVEIRA-FILHO, E.C. **Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente**. Universidade Ciências da Saúde, v. 4, n. 1 / 2, p. 83-100. ISSN: p.1678-5398, 2006.

NASCIMENTO, F. M. F.; MENDONÇA, R. M. G.; MACÊDO, M. I. F.; SOARES, P. S. M. Impactos Ambientais nos Recursos Hídricos da Exploração de Carvão em Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO & II CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, 2., 2002 – Belo Horizonte, **Anais...**, 2002.

NEGRELLE, R. R. B. **The Atlantic forest in the Volta Velha Reserve: a tropical rain forest site outside the tropics**. Biodiversity and Conservation, vol. 11, n. 5, p. 887-919. 2003.

NIETO, J.M.; SARMIENTO, A.S.; OLÍAS, M.; CANOVAS, C.R.; RIBA, I.; KALMAN, J.; DELVALLS, T.A. Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to

the Huelva Estuary. **Environmental International**, v.33, p.445-455, 2007.

NICOLEITE, E.R; CAMPOS, M.L; CITADINI-ZANETTE, V; SANTOS R. dos; MARTINS, R.; SOARES, C.R.F.S. **Mata Ciliar: Implicações técnicas sobre a restauração após mineração de carvão**. Criciúma: SATC, 80p, 2013.

NORDSTROM, D. K.; ALPERS, C. N. ; PTACEK, C. J.; BLOWES, D. W.; Negative pH and extremely acidic mine waters from Iron Mountain, California. **Environmental Science and Technology**. v. 34. p. 254-258. 2000.

PETERSON, MICHAEL. **Produção de sulfato ferroso a partir da pirita: desenvolvimento sustentável**. (Tese de doutorado). Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://www2.eng.ufsc.br/teses/d059.pdf>> Acesso em: 02 de dezembro 2014.

REEVES, R.D.; BAKER. A.J.M. **Metal-accumulation plants**. In: RASKIN, H.; ENSLEY, B.D. (Ed.) *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. London: J, Wiley,p.193-230, 2000.

REMOR, R. **Regeneração natural em blocos experimentais de Mimosa ScabrellaBenth. (Bracatinga): subsídios para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto no sul do Estado de Santa Catarina, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) Universidade

do Extremo Sul Catarinense. Criciúma: Santa Catarina, 109 p, 2004.

ROCCOTIELLO, E.; MANFREDI, A.; DRAVA, G.; MINGANTI, V.; MARIOTTI, M.G.; BERTA, G.; CORNARA, L. Zinc tolerance and accumulation in the ferns *Polypodium cambricum* L. and *Pteris vittata* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 73. 1264–1271. 2010.

SAMPAIO, H.C. Processo de Lavra e Beneficiamento de Carvões, Beneficiamento. Pp. 20-43. In: C.E. TEIXEIRA AND R.J.M. PIRES (EDS.). **Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização**. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p, 2002.

SANTOS et al. Spontaneous vegetation on overburden piles in the coal basin of Santa Catarina, Brazil. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 3, p. 444-452, 2008.

SILVA, L. F. O., OLIVEIRA, M. L. S., DA BOIT, K. M. & FINKELMAN, R. B. Characterization of Santa Catarina (Brazil) coal with respect to human health and environmental concerns. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 31, p. 475–485, 2009.

SILVA, Z.C.C; et al. The problem of determination of some south Brazilian coal seams. In: Encontro de pesquisadores em carvão no Rio Grande do Sul. 2., 1990. Porto Alegre. **Anais...**, Porto Alegre, p.13-14, 1990.

SILVA, W. R. As interações planta-animal na recuperação de áreas degradadas. In: BARBOSA, L.M. (Coord.) **Anais...** Simpósio sobre Recuperação de Áreas degradadas, III, São Paulo, Instituto de Botânica, p. 146-151, 2009.

SILVA, L.F.O.; WOLLENSCHLAGER, M.; OLIVEIRA, M.L.S. A preliminary study of coal mining drainage and environmental health in the Santa Catarina region, Brazil. **Environ Geochem Health**. P. 33:55-5, 2010.

SIMONA, R.; ANDREAS, B.; STEFAN, P. Formation and stability of schwertmannite in acidic mining lakes. **Geochimical Cosmochimica Acta**, 68, 1185– 1197, 2004.

SINGER, P.E.; STUMM, W. **Acid mine drainage: the rate determining step**. Science, v. 167, p. 1121-1123, 1970.

STOFFREGEN, R. E.; ALPERS, C. N.; JAMBOR, J. L. Alunite-jarosite crystallography, thermodynamics, and geochronology. In C. N. Alpers, et al. (Ed.), Sulfate minerals: Crystallography, geochemistry, and environmental significance, reviews in mineralogy. **Mineralogical Society of America**, v.40, p. 453-479, 2000.

SYLVESTRE, L.S. **Revisão taxonômica das espécies da família Aspleniaceae A.B. Frank ocorrentes no Brasil**. Tese. Doutorado em Botânica. Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 12 p, 2001.

SINGH, N.;RAJ, A.; KHARE, P.B.; TRIPATHI, R.D.; JAMIL, S. Arsenic accumulation pattern in 12 indian ferns and assessing the potential of *Adiantum capillus-veneris*, in comparison to *Pteris vittata*, as arsenic hyperaccumulator. **Bioresource Technology** 101. 8960–8968.2010.

SIECESC. **Sindicato da Indústria de Extração de Carvão Mineral do Estado de Santa Catarina**. 2009. Disponível em: <http://www.siecesc.com.br/>. Acesso em: 22 de janeiro de 2015.

SRIVASTAVA, M.; SANTOS, J. SRIVASTAVA, P.; E MA, L.Q. Comparison of arsenic accumulation in 18 fern species and four *Pteris vittata* accessions. **Bioresource Technology** 101. 2691–2699, 2010.

TORREZANI, N.C.; OLIVEIRA, E.F.de. **Problemas ambientais decorrentes da exploração do carvão mineral e a aplicação da ecotoxicologia aquática como ferramenta de biomonitoramento**. O ecologia Australis 17(4): 509-521. 2013.

TORREY, S. **Trace contaminants from coal**. Park Ridge, Napes. Data Corporation. 1978.

TRINDADE, R.B.E.; SOARES, P. S. M. **Tecnologia dos Sistemas Passivos Para o Tratamento de Drenagem Ácida de Mina**. p. 02-52. 2004.

VIGÂNICO EM. **Produção de sulfato ferroso a partir de rejeitos da mineração de carvão.** Prêmio jovem cientista tema: energia e meio ambiente – soluções para o futuro categoria: graduado. Porto Alegre. 2010.

XAVIER, S.RS. DA.; BARROS, I.C.L. Pteridófitas ocorrentes em fragmentos de Floresta Serrana no estado de Pernambuco, Brasil. **Rodriguésia** 54 (83): p. 13-21. 2003.

ZHAO, E.J.; DUNHAM, S.J.; McGRATH, S.P. **Arsenic hyperaccumulation by diferente fern species.** New Phytologist, v.156, n. 1, p. 27-31. Oct. 2002.

WCI. WORLD COAL INSTITUTE. **The coal resource: a comprehensive overview of coal.** World Coal Institute, Londres, Inglaterra, p.44-79, 2005.

WORRAL, F.; PEARSON, D. G. **The Development of acidic ground waters in coal-bearing strata: Part I. Rare earth elements fingerprinting.** Applied Geochemistry. v. 16. p. 1465-1480.2001.

## **5 CAPITULO I**

### **SAMAMBAIAS E LICÓFITAS PRESENTES NOS DEPÓSITOS DE REJEITO E ESTÉREIS DE CARVÃO EM SANTA CATARINA, BRASIL**

#### **RESUMO**

A extração do carvão em Santa Catarina gera prejuízos ambientais, pela retirada do solo fértil, mistura de horizontes com rejeitos ou estéreis e supressão da vegetação. Esse estudo apresenta um levantamento de samambaias e licófitas que ocorrem em áreas de depósitos de rejeitos e estéreis na bacia carbonífera catarinense. O trabalho foi realizado em 23 áreas, distribuídas em seis municípios: Criciúma, Forquilha, Lauro Müller, Siderópolis, Treviso e Urussanga. Coletou-se um exemplar de cada espécie, identificados e exsiccados no Herbário LUSC da UDESC/CAV e no Herbário CRI da UNESC. Foram encontradas 17 espécies, de 14 gêneros pertencentes a 11 famílias botânicas. Na preferência por ambientes a forma predominante foi local aberto. Para as formas biológicas, as hemiptófitas foram mais frequentes enquanto as heliófitas sobressaíram-se quanto às adaptações ambientais. As samambaias e licófitas, estudadas neste trabalho podem ser uma alternativa para projetos de recuperação e monitoramento ambiental, em áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto.

**Palavras-chaves:** Espécies vegetais. Plantas vasculares sem semente. Mineração de carvão. Recuperação ambiental.

#### **CHAPTER I**



## **FERNS AND LYCOPHYTES PRESENT IN DEPOSIT WASTE AND COAL STERILE IN SANTA CATARINA, BRAZIL**

### **ABSTRACT**

The extraction of coal in Santa Catarina generates environmental damage, the removal of fertile soil, mixing with waste or barren horizons and removal of vegetation. This study presents a survey of ferns and lycophytes occurring in areas of waste disposal sites in Santa Catarina coal basin. The study was conducted in 23 areas, distributed in six municipalities: Criciúma, Forquilha, Lauro Müller, Siderópolis, Treviso and Urussanga. Gathered up a copy of each species identified and in the Herbarium exsiccados LUSC UDESC / CAV and in the Herbarium CRI of UNESCO. We have found 17 species of 14 genera belonging to 11 botanical families. The preference for environments the predominant form was open spot. For biological forms, hemicryptophytes were more frequent while heliophytic stood out on environmental adaptations. Ferns and lycophytes, studied in this work can be an alternative to restoration projects and environmental monitoring in areas impacted by coal mining in the open.

**Key-words:** Plant species. Vascular plants without seeds. Coal mining. Environmental recovery.

## 5.1 INTRODUÇÃO

O sul de Santa Catarina concentra importante centro de mineração de carvão, distribuído principalmente nos municípios de Criciúma, Forquilha, Içara, Lauro Müller, Maracajá, Morro da Fumaça, Siderópolis, Treviso e Urussanga (BELOLLI et al., 2002). A atividade mineira gera lucros e renda para a população local e contribui para o Produto Interno Bruto (PIB) do país, mas também, provoca sérios passivos ambientais, levando a deterioração acelerada dos recursos naturais.

A extração do carvão mineral pode ser realizada de duas maneiras: a mineração subterrânea ou a mineração a céu aberto. A mineração subterrânea implica em abertura de poços, planos inclinados, ou galerias de encosta, para extração do minério, transporte de materiais e de pessoal. O método de câmaras e pilares é o mais utilizado no Brasil e consiste na abertura de um eixo principal de transporte, que pode ser constituído de duas ou mais galerias paralelas e perpendiculares; a este são traçados os painéis de produção, onde são abertas galerias de produção. Entre as fases de desenvolvimento são deixados pilares os quais são retirados parcialmente, na fase de recuo (DNPM, 1987).

A mineração a céu aberto é possível quando o carvão está próximo à superfície. Existem inúmeros métodos empregados na exploração do carvão a céu aberto, sendo o mais utilizado, o método *Strip Mining* (em faixas), com variações que dependem das diferentes maneiras de decapeamento em função do equipamento utilizado. Normalmente a cobertura e o carvão são lavrados em sequência de cortes. O estéril removido de um corte é depositado dentro do vazio do corte anterior (DNPM, 1987). Contudo, as duas formas de extração causam intensa degradação ambiental.

Especificamente, na mineração a céu aberto, a degradação é atribuída a um conjunto de fatores, como a remoção de vultuosos volumes de solo e subsolo (camada fértil) invertendo as camadas causando a descaracterização dos horizontes, supressão da vegetação e eliminação do banco de sementes (CITADINI-ZANETTE, 1999). Além disso, durante o beneficiamento há deposição inadequada do rejeito que contém altos teores de enxofre, na forma de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), contaminando as águas subterrâneas e superficiais, potencializando os efeitos nocivos ao meio ambiente.

Atualmente, grande parte da zona rural da região carbonífera catarinense encontra-se descaracterizada, sendo formada por imensos depósitos de rejeitos e estéreis. Nessas áreas impactadas a vegetação encontra-se alterada em relação as suas características originais, sendo constituída em maior proporção por espécies exóticas introduzidas como *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D. Webster e *Eucalyptus* spp. (NICOLEITE et al., 2013), ou ainda em muitas áreas a vegetação é inexistente.

Segundo Klein et al. (2009), mesmo com a degradação, é possível encontrar na região remanescentes florestais com certa diversidade específica, entretanto, com ausência do padrão biótico anterior, devido principalmente à perda de vetores de dispersão.

Entre as espécies vegetais que são comumente encontradas na região destaca-se o grupo das samambaias e licófitas, conhecidas popularmente por pteridófitas, com representantes dos gêneros *Adiantum*, *Blechnum* e *Pteridium*, com algumas espécies utilizadas como plantas ornamentais (KAWAKAMI, 1992) e de *Dicksonia* e *Cyathea* utilizadas que no passado foram utilizadas como matéria-prima para a indústria de vasos de xaxim (SALVADOR et al., 2001).

Algumas espécies se destacam por serem resistentes a ambientes degradados, pois são pouco exigentes em fertilidade do solo e sobrevivem a longos períodos de estiagem (MORAN,

2008; PRADO; SYLVESTRE, 2010). Por sobreviverem em locais inóspitos como os depósitos de rejeitos, possuem rusticidade e serem espécies nativas da região, as samambaias e licófitas podem ser uma forma de recuperação inicial das áreas impactadas pela mineração, buscando restabelecer estruturas e funções ecológicas que haviam no ecossistema antes da degradação (AUMOND, 2003).

Visando encontrar alternativas viáveis para a reabilitação de ecossistemas degradados pela mineração de carvão, esse estudo tem por objetivos conhecer as espécies de samambaias e licófitas que ocorrem em áreas de depósitos de rejeitos na bacia carbonífera catarinense e, fornecer informações sobre esse grupo de plantas que poderá integrar projetos de recuperação e monitoramento de áreas impactadas pela atividade carbonífera.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na região da bacia carbonífera catarinense, que integra a Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC). De acordo com EMBRAPA (1998), a unidade geomorfológica da região é a depressão da zona carbonífera catarinense, conhecida como Bacia Carbonífera Catarinense, ocorrendo em uma faixa alongada na direção N-S, ocupando uma área de 1.659 km<sup>2</sup> e situada no extremo sul do estado. Constitui-se de relevos residuais de topo plano, decorrentes de rochas mais resistentes e remanescentes de antigas superfícies de aplanamentos, tendo como solos mais representativos os Argissolos correspondendo a 43,1% da região e os Cambissolos presentes em 24,22%. (BACK, 2009).

O clima predominante da região, segundo Koppen, é classificado como Cfa (Mesotérmico, úmido e com verões quentes) com variações significativas na precipitação e

temperatura. Mais especificamente, de acordo com o Zoneamento Agroecológico de Santa Catarina (EPAGRI, 1999) que adota o zoneamento baseado em combinações de vegetação, geomorfologia e características climáticas, conforme Braga e Ghellere (1999), para os municípios da região AMREC abrangidos neste estudo, tem-se clima do tipo Cfa para Criciúma, Forquilha e Urussanga e clima do tipo Cfa e Cfb para Lauro Muller, Siderópolis e Treviso.

A temperatura e a precipitação média anual para os municípios com clima predominante do tipo Cfa varia de 17-19,3<sup>0</sup>C e 1220-1660 mm e para os municípios com clima do tipo Cfa e Cfb a variação é de 11,4-19,3<sup>0</sup>C e 1220-1820 mm, respectivamente. Em geral a umidade relativa média mensal é superior a 80% e o número de geadas é de 0,3-11 para os municípios com clima do tipo Cfa e de 0,3-36 para os municípios com clima do tipo Cfa e Cfb (BACK, 2009).

A vegetação do estado de Santa Catarina pertence ao bioma Mata Atlântica, que compreende diversas fitofisionomias que propiciaram significativa diversidade ambiental (COLLARES, 2006). Neste bioma está incluída a Floresta Ombrófila Densa, situada em todo litoral, entre o planalto da Serra Geral e o oceano Atlântico, em altitude de 5 a 1.000 metros (SANTA CATARINA, 1986). Na Floresta Ombrófila Densa, pode-se observar quatro formações distintas: Floresta das Terras Baixas, Submontana, Montana e Altomontana. Na região de estudo estão presentes duas formações pertencentes a este bioma as chamadas Terras Baixas e Submontana, distintas de acordo com a altitude de ocorrência. A formação das Terras Baixas localiza-se entre 5 e 30 m de altitude e a Submontana tem altitude entre 30 e 400 m acima do nível do mar (IBGE, 2012).

As áreas de estudo estão distribuídas em seis municípios da região carbonífera, sendo eles: Criciúma, Forquilha, Lauro Müller, Siderópolis, Treviso e Urussanga (ver Figura 1). Os locais de estudo são depósito de rejeito



Quadro 1 - Descrição das áreas de estudo na região carbonífera de Santa Catarina. (Continua).

| <b>Município</b> | <b>ID camp<br/>o</b> | <b>Idade<br/>estimada**</b> | <b>ID área*</b>                  | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                              |
|------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Urussanga        | <b>A1</b>            | 32 anos                     | Setor Santana<br>Encosta área 3  | Dois ambientes: (1º) Depósito de finos e ultrafinos de carvão;<br>(2º) depósito de estéril.                                                                                   |
|                  | <b>A2</b>            | 32 anos                     | Barranco de<br>beira de estrada  | Depósito de estéril.                                                                                                                                                          |
|                  | <b>A3</b>            | 32 anos                     | Setor Santana<br>Plano II Área 4 | Deposito de finos e ultrafinos de carvão.                                                                                                                                     |
|                  | <b>A4</b>            | 32 anos                     | Setor Santana<br>Poço 8 área I   | Depósito de estéril.                                                                                                                                                          |
|                  | <b>A15</b>           | 32 anos                     | Céu Aberto                       | Mineração a céu aberto. Ausência de práticas de construção<br>topografia e de solo. Presença de rejeito e estéril.                                                            |
|                  | <b>AT2</b>           | -                           | Testemunha                       | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                                 |
|                  | <b>AT3</b>           | -                           | Testemunha                       | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                                 |
|                  | <b>AT4</b>           | -                           | Testemunha                       | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                                 |
| Treviso          | <b>A6</b>            | 52 anos                     | Céu Aberto                       | Mineração a céu aberto. Dois ambientes: (1º) Ausência de<br>práticas de construção topografia e de solo. Depósito de<br>estéril. (2º) Depósito de fino e ultrafino de carvão. |
|                  | <b>A20</b>           | 52 anos                     | Área União                       | Depósito de estéril.                                                                                                                                                          |
|                  | <b>A21</b>           | 52 anos                     | Área União                       | Depósito de rejeito-piritoso, mistura de solo e fragmentos de                                                                                                                 |

| <b>Município</b> | <b>ID<br/>camp<br/>o</b> | <b>Idade<br/>estimada**</b> | <b>ID área*</b>     | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                          |                             |                     | rocha.                                                                                                                                                          |
| Siderópolis      | <b>A7</b>                | 42 anos                     | Língua do Dragão    | Depósito de fino e ultrafino. Atualmente recebe efluentes de outras cavas localizadas ao redor.                                                                 |
|                  | <b>A19</b>               | 42 anos                     | Céu aberto          | Mineração a céu aberto. Ausência de práticas de construção topografia e de solo. Presença de estéril.                                                           |
|                  | <b>A22</b>               | 42 anos                     | Mina do Trevo       | Mineração a céu aberto com presença de uma pequena camada de “solo” na superfície cobrindo rejeito- piritoso.                                                   |
|                  | <b>A23</b>               | 42 anos                     | Mina do Trevo       | Mineração a céu aberto com presença de uma pequena camada de “solo” na superfície cobrindo rejeito – piritoso.                                                  |
|                  | <b>AT1</b>               | -                           | <b>Testemunha</b>   | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                   |
| Criciúma         | <b>A8</b>                | 42 anos                     | Bairro Colonial     | Depósito de estéril.                                                                                                                                            |
|                  | <b>A9</b>                | 42 anos                     | Bairro Santa Luzia  | De Depósito de estéril. Deposição de resíduo sólido urbano                                                                                                      |
|                  | <b>A16</b>               | 42 anos                     | Setor Linha Batista | Dois ambientes: (1º) Depósito de estéril. (2º) Depósito de fino e ultrafino de carvão. Ocorrência de resíduos sólidos urbanos.                                  |
|                  | <b>A17</b>               | 42 anos                     | Setor Linha Batista | Dois ambientes: (1º) Depósito de estéril. (2º) Depósito de fino e ultrafino de carvão. Ocorrência de resíduos sólidos urbanos.                                  |
|                  | <b>A18</b>               | 42 anos                     | Setor Linha Batista | Depósito de estéril. Presença de DAM, fragmento de rocha e piritita; lago intermitente formado pela contribuição da precipitação com água de coloração azulada. |
| Forquilha        | <b>A10</b>               | 52 anos                     | Depósito de rejeito | Deposição de fino e ultrafino de carvão.                                                                                                                        |



| <b>Município</b> | <b>ID<br/>camp<br/>o</b> | <b>Idade<br/>estimada**</b> | <b>ID área*</b>        | <b>Descrição</b>                                                                                                                              |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | <b>A11</b>               | 52 anos                     | Depósito de<br>rejeito | Bacia de decantação de fino e ultrafino de carvão com<br>presença de pequenas lagoas com água avermelhada e nas<br>margens ocorrência de DAM. |
| Lauro Muller     | <b>A5</b>                | 40 anos                     | Rocinha                | Depósito de rejeito-piritoso.                                                                                                                 |
|                  | <b>A12</b>               | 40 anos                     | ÁREA 10                | Depósito de estéril.                                                                                                                          |
|                  | <b>A13</b>               | 40 anos                     | ÁREA 4                 | Depósito de estéril.                                                                                                                          |
|                  | <b>A14</b>               | 40 anos                     | Céu aberto             | Depósito de estéril.                                                                                                                          |

\*Identificação das áreas de acordo com nomenclatura do Ministério Público Federal de Criciúma/SC.

Fonte: Próprio autor.

(Conclusão).

### 5.2.2 Coleta e caracterização das samambaias e licófitas

As atividades de campo foram realizadas ao longo do ano de 2012, sendo que em cada um dos 23 depósitos foi efetuada uma coleta. Para a localização geográfica dos depósitos utilizou-se o equipamento GPS modelo Garmin.

A amostragem foi realizada por meio da coleta de um morfotipo de cada espécie de samambaia e licófitas visualizada através de caminhamento (FILGUEIRAS et al., 1994), em cada área, onde incluíram-se diferentes ambientes, como barrancos e beira de estradas. A coleta dos morfotipos ocorreu com a remoção da planta por completo, preservando-se as características de cada indivíduo, tais como, frondes e raízes, e anotando-se as características taxonômicas e morfológicas a fim de realizar uma identificação prévia das espécies facilitando o reconhecimento. Todos os morfotipos foram cuidadosamente acondicionados em sacos plásticos devidamente identificados e abertos para evitar modificações abruptas na conformação do material e na conservação da estrutura da planta, ocasionadas pelo transporte, para posterior montagem das exsicatas.

Os exemplares coletados foram levados para Universidade do Estado de Santa Catarina UDESC/CAV, em Lages, onde foi realizado o processamento usual no Laboratório de Levantamento e Análise Ambiental.

Para delimitação de famílias, gêneros e espécies das samambaias (monilófitas) seguiu-se a classificação proposta por Smith et al. (2006, 2008), com revisão de Rothfels (2012) e para as licófitas seguiu-se a classificação de Kramer e Green (1990). O material exsicatado e catalogado foi incorporado aos acervos do Herbário LUSC da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CAV) e do Herbário CRI da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

Durante os trabalhos de campo foram realizadas observações para cada espécie, em todas as áreas de coleta, referentes a ambientes preferenciais, formas biológicas e adaptações ambientais, conforme procedimentos de Senna e Waechter (1997).

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram registradas 17 espécies distribuídas em 14 gêneros pertencentes a 11 famílias botânicas nas áreas de depósitos de rejeitos e de estéril na região da bacia carbonífera catarinense. As famílias e respectivas espécies pertencem aos grupos licófitas e samambaias.

#### LICÓFITAS

1 LYCOPODIACEAE – Táxons no Brasil: 09 gen. e 64 spp. Santa Catarina: 09 gen. e 32 spp. Criciúma, Lauro Muller, Siderópolis, Treviso e Urussanga: 01 gen. e 01 spp.

1.1 *Palhinhaea cernua* (L.) Vasc & Franco. Nome popular: Musgo-do-mato; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito /heliófito; ambientes preferenciais: local úmido/barranco/local aberto; hábito: hemicriptófito; material coletado nos depósitos A13 (ÁREA 4), A14 (Céu Aberto), A15 (Céu Aberto), A16 (Setor Linha Batista), A17 (Setor Linha Batista) e A19 (Céu Aberto): julho a setembro/2012; 6494 (LUSC). (ver Figura 2 (a) e (b)).

Figura 2 - *Palhinhaea cernua* (L.) Vasc & Franco (a) e (b).



Fonte: Próprio autor.

## SAMAMBAIAS

1 ANEMIACEAE – Táxons no Brasil: 01 gen. e 51 spp. Santa Catarina: 01 gen. e 07 spp. Siderópolis: 01 gen. e 01 spp.

1.1 *Anemia phyllitidis* (L.) Sw. Nome popular: Avenca-de-cacho, feto-pluma, pluma-de-cacho; *status*: nativa; adaptações ambientais: esciófita/mesófito; ambientes preferenciais: interior de mata/borda de mata/barranco hábito: hemicriptófito; material coletado no depósito A23 - Mina do Trevo: março/2012; 6568 (LUSC). (ver Figura 3 (a) e (b)).

Figura 3 - *Anemia phyllitidis* (L.) Sw (a) e (b).



Fonte: Próprio autor.

2 BLECHNACEAE – Táxons no Brasil: 02 gen. e 32 spp.  
 Santa Catarina: 02 gen. e 21 spp. Criciúma, Lauro Muller, Siderópolis e Urussanga. 01 gen. e 02 spp.

2.1 *Blechnum brasiliense* Desv. Nome popular: Xaxim; *status*: nativa; adaptações ambientais: esciófita/mesófita; ambientes preferenciais: local úmido/interior de mata/borda de mata/local aberto; hábito: caméfito; material coletado nos depósitos A2 (Barranco de beira de estrada), A17 (Setor Linha Batista), A19 (Céu Aberto), A22 (Mina do Trevo) e A23 (Mina do Trevo): março/2012; 6504 (LUSC). (ver Figura 4 (a)).

2.2 *Blechnum serrulatum* Rich. Nome popular: -- *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófita/heliófita; ambientes preferenciais: borda de mata/local aberto; hábito: geófita; material coletado nos depósitos A3 (Setor Santana Poço 8 área I), A5 (Rocinha), A7 (Língua do Dragão), A8 (Bairro Colonial), A16 (Setor Linha Batista) e A22 (Mina do Trevo): março/2012; 6487 (LUSC). (ver Figura 4 (b)).

Figura 4 - *Blechnum brasiliense* Desv (a); *Blechnum serrulatum* Rich (b)



Fonte: Próprio autor.

3 CYATHEACEAE – Táxons no Brasil: 03 gen. e 45 spp. Santa Catarina: 03 gen. e 14 spp. Criciúma, Lauro Muller e Siderópolis. 01 gen. e 02 spp.

3.1 *Cyathea atrovirens* (Langsd. & Fisch). Domim. Nome popular: Samambaiacú; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito/heliófito; ambientes preferenciais: borda de mata; hábito: fanerófito; material coletado nos depósitos A13 (ÁREA 4), A14 (Céu Aberto), A17 (Setor Linha Batista) e A19 (Céu Aberto): março/2012; 6500 (LUSC). (ver Figura 5 (a)).

3.2 *Cyathea cf. phalerata* Mart. Nome popular: Xaxim-espinhento; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito; ambientes preferenciais: interior de mata/borda de mata; hábito: fanerófito; material coletado no depósito A19 (Céu Aberto): março/2012; 6506 (LUSC). (ver Figura 5 (b)).

Figura 5 - *Cyathea atrovirens* (Langsd. & Fisch). Domim (a); *Cyathea cf. phalerata* Mart. (b).

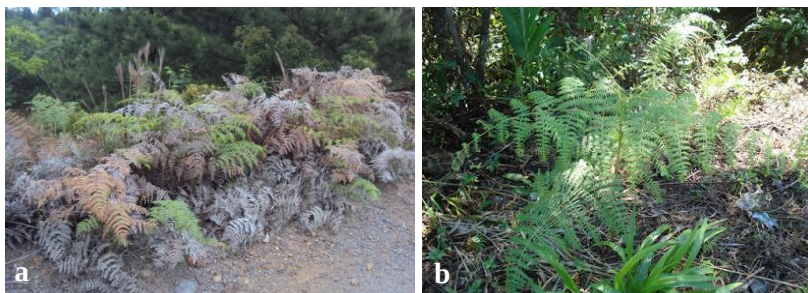


Fonte: Próprio autor.

4 DENNSTAEDTIACEAE – Táxons no Brasil: 07 gen. e 22 spp. Santa Catarina: 07 gen. e 10 spp. Criciúma, Forquilha, Lauro Muller, Treviso, Siderópolis e Urussanga. 01 gen. e 01 spp.

4.1 *Pteridium arachnoideum* (Kaulf.) Maxon. Nome popular: Ninho de galinha, Samambaia-das-taperas, samambaia-do-campo; *status*: nativa; adaptações ambientais: heliófita; ambientes preferenciais: clareira/local aberto; hábito: geófito; material coletado nos depósitos A1(Setor Santana Encosta área 3), A2 (Barraco de beira de estrada), A3 (Setor Santana Plano 2 área 4), A4 (Setor Santana Poço 8 área I), A5 (Rocinha), A6 (Céu Aberto), A7 (Língua do Dragão), A8 (Bairro Colonial), A9 (Bairro Santa Luzia), A10 (Depósito de rejeito), A11 (Depósito de rejeito), A12 (ÁREA 10), A13 (ÁREA 4), A14 (Céu Aberto), A15 (Céu Aberto), A16 (Setor Linha Batista), A17 (Setor Linha Batista), A18 (Setor Linha Batista), A19 (Céu Aberto), A20 (Área União), A21 (Área União), A22 (Mina do Trevo): de março a novembro/2012, fruto; 6498 (LUSC). (ver Figura 6 (a) e (b)).

Figura 6 - *Pteridium arachnoideum* (Kaulf.) Maxon (a) e (b).



Fonte: Próprio autor.

5 DRYOPTERIDACEAE – TÁXONS NO BRASIL: 15 gen. e 179 spp. Santa Catarina: 14 gen e 52 spp. Siderópolis. 03 gen. e 03 spp.

5.1 *Elaphoglossum* sp. Nome popular: Língua de boi; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito; ambientes preferenciais: borda de mata/barranco/local aberto; hábito: hemicriptófito; material coletado no depósito A23 (Mina do Trevo): abril a junho/2012; 6481 (LUSC). (ver Figura 7 (a)).

5.2 *Lophosoria quadripinnata* (J.F. Gmel). C. Chr. Nome popular:--; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito; ambientes preferenciais: local úmido/borda de mata/barranco; hábito: hemicriptófito; material coletado no depósito A19 (Céu Aberto): abril a junho/2012; 6502 (LUSC). (ver Figura 7 (b)).

5.3 *Rumohra adiantiformis* (G. Forst.) Ching. Nome popular: Samambaia-preta; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito; ambientes preferenciais: borda de mata/local aberto; hábito: geófito; material coletado no depósito A23 (Mina do Trevo): abril a junho/2012; 6490 (LUSC). (ver Figura 7 (c)).



Figura 7 - *Elaphoglossum* sp. (a) *Lophosoria quadripinnata* (J.F. Gmel). C. Chr. (b) *Rumohra adiantiformis* (G. Forst.) Ching. (c).



Fonte: Próprio autor.

6 GLEICHENIACEAE – Táxons no Brasil: 03 gen. e 14 spp. Santa Catarina: 03 gen. e 10 spp. Criciúma, Lauro Muller, Siderópolis, Treviso e Urussanga: 02 gen. e 02 spp.

6.1 *Dicranopteris flexuosa* (Schrader) Underw. Nome popular:--; *status*: nativa; adaptações ambientais: heliófita; ambientes preferenciais: barranco/local aberto; hábito: hemicriptófita; material coletado nos depósitos A12 (ÁREA 10), A17 (Setor Linha Batista), A18 (Setor Linha Batista) e A19 (Céu Aberto): julho a setembro/2012; 6496 (LUSC). (ver Figura 8 (a)).

6.2 *Gleichenella pectinata* (Willd.) Ching. Nome popular:--; *status*: nativa; adaptações ambientais: heliófita; ambientes preferenciais: barranco/local aberto; hábito: hemicriptófita; material coletado nos depósitos A3 (Setor Santana Plano 2 área 4), A6 (Céu Aberto), , A12 (ÁREA 10), A13 (ÁREA 4), A14 (Céu Aberto), A15 (Céu Aberto) e A19 (Céu Aberto): julho a setembro/2012; 6483 (LUSC). (ver Figura 8 (b)).

Figura 8 - *Dicranopteris flexuosa* (Schrad.) Underw (a), *Gleichenella pectinata* (Willd.) Ching. (b).



Fonte: Próprio autor.

7 LOMARIOPSIDACEAE – Táxons no Brasil: 03 gen. e 14 spp. Santa Catarina: 03 gen. e 07 spp. Siderópolis. 01 gen. e 01 spp.

7.1 *Nephrolepis cordifolia* (L.) C. Presl. Nome popular: Feto-espada, feto-crespo, feto-faca; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito/heliófito; ambientes preferenciais: borda de mata/local aberto; hábito: hemicriptófito; material coletado no depósito A23 (Mina do Trevo): abril/2012; 6492 (LUSC). (ver Figura 9 (a) e (b)).

Figura 9 - *Nephrolepis cordifolia* (L.) C. Presl. (a) e (b).



Fonte: Próprio autor.

8 LYGODIACEAE – Táxons no Brasil: 01 gen. e 02 spp.  
Santa Catarina: 01 gen. e 02 spp. Criciúma, Lauro Muller e  
Siderópolis: 01 gen. e 01 spp.

8.1 *Lygodium venustum* Sw. Nome popular: Coentrão; *status*:  
nativa; adaptações ambientais: mesófito; ambientes  
preferenciais: borda de mata/barranco/clareira; hábito:  
hemicriptófito; material coletado nos depósitos A13 (ÁREA 4),  
A15 (Céu Aberto), A16 (Setor Linha Batista), A17 (Setor  
Linha Batista) A19 (Céu Aberto), A22 (Mina do trevo) e A23  
(Mina do Trevo): março/2012; 6501 (LUSC). (ver Figura 10  
(a) e (b)).

Figura 10 - *Lygodium venustum* Sw (a) e (b).



Fonte: Próprio autor.

9 PTERIDACEAE – Táxons no Brasil: 22 gen. e 196 spp. Santa Catarina: 16 gen. e 68 spp. Criciúma, Forquilha, Lauro Muller, Treviso, Siderópolis e Urussanga: 01 gen. e 01 spp.

9.1 *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link. Nome popular: Samambaia-do-brejo *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito /heliófito; ambientes preferenciais: local úmido/barranco/local aberto; hábito: hemicriptófito; material coletado nos depósitos A1(Setor Santana Encosta área 3), A2 (Barraco de beira de estrada), A4 (Setor Santana Poço 8 área I), A5 (Rocinha), A6 (Céu Aberto), A7 (Língua do Dragão), A8 (Bairro Colonial), A9 (Bairro Santa Luzia), A10 (Depósito de rejeito), A11 (Depósito de rejeito), A12 (ÁREA 10), A13 (ÁREA 4), A14 (Céu Aberto), A15 (Céu Aberto), A16 (Setor Linha Batista), A17 (Setor Linha Batista), A18 (Setor Linha Batista), A19 (Céu Aberto), A20 (Área União), A21 (Área União), A22 (Mina do Trevo): de março a novembro/2012; 6512 (LUSC). (ver Figura 11 (a) e (b)).

Figura 11 - *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link (a) e (b).



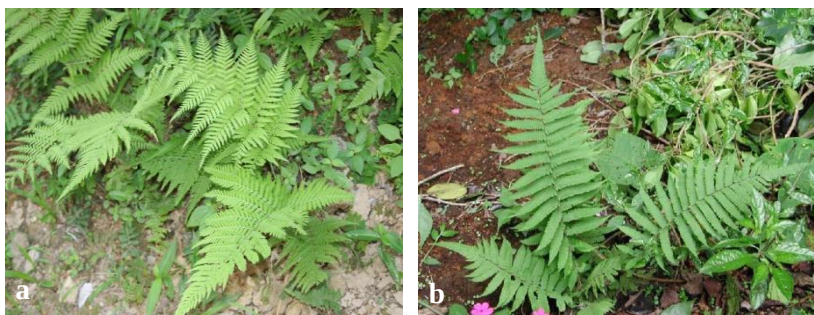
Fonte: Próprio autor.

10 THELYPTERIDACEAE – Táxons no Brasil: 02 gen. e 86 spp. Santa Catarina: 02 gen. e 61 spp. Siderópolis: 02 gen. e 02 spp.

10.1 *Macrothelypteris torresiana* (Gaudich.) Ching. Nome popular: Samambaia; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito; ambientes preferenciais: borda de mata; hábito: hemicriptófito; material coletado nos depósitos A22 (Mina do Trevo) e A23 (Mina do Trevo); de março a novembro/2012; 6514 (LUSC). (ver Figura 12 (a)).

10.2 *Thelypteris dentata* (Forssk.) E.P.St. John. Nome popular: Rabo de gato; *status*: nativa; adaptações ambientais: mesófito /heliófito; ambientes preferenciais: interior de mata/borda de mata; hábito: hemicriptófito; material coletado nos depósitos A23 (Mina do Trevo); de março a novembro/2012; 6516 (LUSC). (ver Figura 12 (b)).

Figura 12 - *Macrothelypteris torresiana* (Gaudich.) Ching (a)  
*Thelypteris dentata* (Forssk.) E.P.St. John (b).



Fonte: Próprio autor.

Em relação à representatividade das famílias foi verificado que Dryopteridaceae apresentou a maior riqueza específica com três espécies, seguida por Blechnaceae, Cyatheaceae, Gleicheniaceae e Thelypteridaceae com duas espécies cada e Anemiaceae, Davalliaceae, Dennstaedtiaceae, Lycopodiaceae, Pteridaceae com somente uma espécie cada.

Trabalhos realizados em diferentes locais e fitofisionomias brasileiras por Assis (2009) na Borda Oeste do Pantanal em Mato Grosso do Sul, Lehn et al. (2009) em dois remanescentes de Floresta Estacional Decidual no Rio Grande do Sul e Gasper e Sevegnani (2010) no Parque Nacional da Serra de Itajaí em Santa Catarina, reportam Dryopteridaceae e/ou Pteridaceae como sendo as famílias mais representativas.

Segundo Smith et al. (2008), Dryopteridaceae e Pteridaceae estão entre as famílias que apresentam maior número de espécies, tanto no mundo todo quanto no território brasileiro, tendo maior amplitude nos trópicos, juntamente com Polypodiaceae, representada por uma espécie no presente estudo (TRYON; TRYON, 1982).



No que se refere a ambientes preferenciais, a forma predominante foi local aberto compreendendo dez espécies, com maior representatividade nos gêneros *Blechnum*, *Elaphoglossum*, *Pteridium*, *Rumohra*, *Dicranopteris*, *Gleichenella*, *Palhinhaea*, *Pityrogramma*. No interior e borda de mata tiveram a segunda maior representatividade com oito gêneros *Anemia*, *Blechnum*, *Cyathea*, *Nephrolepis*, *Lophosoria*, *Macrothelypteris* e *Thelypteris*. O terceiro ambiente preferencial foi barranco com quatro espécies dos gêneros *Anemia*, *Dicranopteris*, *Gleichenella* e *Lygodium*. Por fim, os ambientes clareira e local úmido com duas espécies cada dos gêneros *Pteridium*, *Palhinhaea* e *Pityrogramma* (ver Figuras 2 a 12).

Vale ressaltar que algumas das espécies registradas possuem capacidade de se adaptar a mais de um tipo de ambiente como, por exemplo, *Anemia phyllitidis* que tem como ambiente preferencial o interior e borda de mata, além de barranco. Os ambientes constatados para a espécie supracitada corroboram com o estudo de Gasper e Sevegnani (2010) que registraram exemplares desta espécie desenvolvendo-se nos mesmos ambientes no Parque Nacional da Serra de Itajaí em Santa Catarina.

*Blechnum serrulatum*, *B. brasiliense*, ocorrendo na borda e interior de mata e local aberto, *Nephrolepis cordifolia*, *Macrothelypteris torresiana* e *Thelypteris dentata* em interior e borda de mata, *Pteridium arachnoideum* em local aberto e clareira, *Dicranopteris flexuosa*, *Gleichenella pectinata* e *Lygodium venustum* em local aberto e barranco e *Pityrogramma calomelanos* em clareira, local úmido e local aberto, denotam a elevada plasticidade ecológica dessas espécies e a capacidade de se adaptarem a ambientes hostis como os encontrados nas áreas de estudo.

*Pityrogramma calomelanos* foi uma das espécies que apresentou grande variedade de ambientes, pois gametófitos e esporófitos foram observados crescendo em rejeito exposto e

com estágio avançado de oxidação ou quando o mesmo estava misturado ao solo, em locais mais úmidos e/ou com incidência solar acentuada, próximos a pedras ou a outras plantas e em alguns barrancos e clareias expostos a luz solar direta. Este comportamento ratifica o mencionado por Citadini-Zanette e Boff (1992) em seu estudo que focou a vegetação espontânea após a mineração a céu aberto na região carbonífera no sul de Santa Catarina.

Algumas famílias apresentam certas características marcantes como no caso de Gleicheniaceae, Dennstaedtiaceae e Lycopodiaceae, em que suas espécies foram encontradas exclusivamente em locais que denotam ambientes com incidência direta de luz solar e umidade, evidenciando que tais espécies se desenvolvem em ambientes alterados e ensolarados. O mesmo comportamento foi registrado em trabalho realizado no Parque Nacional da Serra de Itajaí, para essas famílias (GASPER; SEVEGNANI, 2010).

Em relação às formas biológicas, as pteridófitas hemicriptófitas, estão representadas por dez espécies em Anemiaceae, Davalliaceae, Dennstaedtiaceae, Dryopteridaceae, Lygodiaceae, Pteridaceae e Thelypteridaceae, sendo esta a forma biológica predominante. A forma caméfito está representada por três espécies das Blechnaceae e Lycopodiaceae, seguida da forma geófito com duas espécies da família Gleicheniaceae e a fanerófito com duas espécies da família Cyatheaceae (ver Figuras 2 a 12).

A predominância de hemicriptófitas também foi constatada em trabalhos desenvolvidos no Cerrado por Athayde Filho e Windisch (2003) que registraram 54 espécies com essa forma de vida. As hemicriptófitas também são mais frequentes, em diversos ecossistemas brasileiros e mundiais (KÓRNAS, 1985; SANTIAGO; BARROS, 2003; ATHAYDE FILHO; WINDISCH, 2003; LENH; ASSIS, 2013).



A prevalência de hemicriptófitas pode estar relacionada ao fato de apresentar a gema de perenização ao nível do solo ou ligeiramente abaixo deste (SENNA; WAECHTER, 1997). Este é um aspecto ecológico das samambaias e licófitas que ocorrem no Brasil, posto que inúmeros estudos realizados em diferentes regiões do país têm citado as hemicriptófitas como sendo a forma biológica dominante entre as espécies. Essa característica proporciona proteção às gemas vegetativas contra a dessecação, enquanto as espécies com gemas menos protegidas estão sujeitas a um maior estresse ambiental (KÓRNAS, 1985).

*Pteridium arachnoideum* e *P. calomelanos* foram encontradas em 21 das 23 áreas de coleta. A maioria dessas áreas se caracterizam por serem depósitos de rejeito bruto, ou seja, ainda sem nenhum processo de recuperação aplicado, diferentemente das duas áreas onde não houve ocorrência dessas espécies que visualmente haviam indícios de recuperação, por apresentarem solo misturado aos rejeitos e gramíneas de espécies variadas. *P. calomelanos* foi a espécie mais frequente em áreas de mineração de carvão a céu aberto estudada no sul de Santa Catarina por Citadini-Zanette e Boff (1992). Essa ampla distribuição nas áreas amostradas, principalmente das espécies supracitadas, provavelmente está relacionada ao fato das pteridófitas serem normalmente encontradas em ambientes com maior atividade antrópica (AMBRÓSIO; BARROS, 1997). Preferencialmente, as pteridófitas ocorrem em ambientes com suporte hídrico regular e sombreamento, porém algumas delas são capazes de sobreviver em ambientes secos e com incidência solar constante. Para isso, desenvolveram uma vasta gama de adaptações ambientais como, por exemplo, a proteção contra o fogo, deficit hídrico, entre outras, permitindo seu desenvolvimento em ambientes hostis (PORTAL EDUCAÇÃO, 2013.)

Já *Anemia phyllitidis*, embora tenha grande distribuição em regiões tropicais, ocorreu em apenas uma área deste estudo, onde se observou indícios de recuperação, estando localizada nas bordas e interior da vegetação espontânea. A espécie em questão é uma herbácea com hábito terrícola e preferência por ambientes com sombreamento (esciófita) e umidade, sendo este o cenário encontrado na área de coleta. O sombreamento era proporcionado por outras espécies existentes no local, conservando com isso a umidade no substrato onde a mesma se desenvolvia.

*Rumohra adiantiformis* apesar de ter como adaptação ambiental a forma esciófita é comum em ambientes alterados como os do presente estudo, sendo capazes de se desenvolver em locais com incidência solar constante e suprimento hídrico variado.

*Lygodium venustum*, adaptada a ambientes úmidos, forma mesófila, foi encontrada em inúmeras áreas de coleta, tendo como característica comum o substrato formado por rejeitos piritosos e visivelmente úmido.

Quanto às espécies exóticas, foram encontradas nas áreas de estudo *Macrothelypteris torresiana*, *Thelypteris dentata* e *Nephrolepis cordifolia*. Estas espécies também citadas por Schwartsburd e Labiak (2007) são de ocorrência espontânea ou subespontânea em regiões do continente, apesar de extra-americanas. *M. torresiana* é naturalizada no neotrópico e foi introduzida das regiões tropicais e subtropicais do velho Mundo (África, Ásia e Ilhas do Pacífico). É comum em locais úmidos alterados, podendo formar banco de esporos (PONCE, 1987).

Para as adaptações ambientais as espécies mais representativas foram as heliófitas, que englobou cinco famílias e sete espécies, seguida de duas famílias com uma espécie cada que contemplam duas formas de adaptações: mesófila e heliófita. Os locais onde as mesmas foram encontradas

continham rejeitos piritosos puro e misturados a rochas de cobertura da camada do carvão, com vegetação rasteira esparsa, incidência solar constante e pouca umidade, demonstrando o potencial que as samambaias e licófitas têm de sobreviverem a ambientes inóspitos.

As espécies da família Blechnaceae (*B. brasiliense* e *B. serrulatum*) e Dryopteridaceae (*Elaphoglossum* sp., *L. quadripinnata* e *R. adiantiformis*) se encaixam na classificação mesófito e esciófito, e a espécie *R. adiantiformis*, também da família Dryopteridaceae que se encaixa na classificação mesófito, sendo plantas que necessitam de ambientes sombreados e úmidos para sobreviver, o que denota a relevância deste grupo de plantas nas ações posteriores ao processo de recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão. Essas espécies foram encontradas preferencialmente em depósitos mais antigos, alguns com tentativas de recuperação, onde o substrato era formado por rejeito, sólim e rochas de cobertura da camada do carvão e com outras espécies vegetais pioneiras e secundárias sendo que em alguns locais também havia a presença de árvores exóticas.

Não foram encontradas nas áreas de estudos samambaias e licófitas que habitam ambientes higrófitos e xerófitos, ou seja, espécies que se desenvolvem em ambientes submersos na água ou adaptadas a ambientes com pouca umidade, respectivamente.

## 5.4 CONCLUSÃO

No levantamento de samambaias e licófitas realizado em áreas de depósito de rejeito e estéreis no sul do estado de Santa Catarina foram registradas 17 espécies pertencentes a 11 famílias botânicas.

As espécies encontradas demonstravam resistência às condições inóspitas do meio, sendo caracterizadas como pioneiras em estádios iniciais de sucessão ecológica espontânea

podendo ser uma alternativa para a revegetação de áreas impactadas pela atividade carbonífera.

## REFERÊNCIAS

AMBRÓSIO, S. T.; BARROS, I. C. L. Pteridófitas de uma área remanescente de Floresta Atlântica do Estado de Pernambuco, Brasil. **Acta Botânica Brasilica**, Porto Alegre 11(2): p. 105-113, 1997.

ASSIS, E. L. M.; LABIAK, P. H. Polypodiaceae da borda oeste do Pantanal sul-mato-grossense, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica** 32: 233 – 247, 2009.

AUMOND, J. J. Teoria dos Sistemas: uma nova abordagem para recuperação e restauração ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 2. 2003, Itajaí. **Anais...** Itajaí, UNIVALI, p. 10-16, 2003.

ATHAYDE-FILHO, F. P.; WINDISCH, P. G. **Análise da pteridoflora da Reserva Biológica Mário Viana, Município de Nova Xavantina, Estado de Mato Grosso (Brasil)**. Bradea, Rio de Janeiro, v. 9, p. 67-76, 2003.

BACK, A.J. Caracterização climática. In: BACK, A.J. **Mineração de carvão, meio ambiente e desenvolvimento sustentável no sul de Santa Catarina: uma abordagem interdisciplinar**. Ed. Afiliada, 2009.

BELLOLI, M.; QUADROS, J.; GUIDI, A. **A história do carvão de Santa Catarina. Criciúma**: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 296 p, 2002.

BRAGA,H.J.;GHELLERE, R. Proposta da diferenciação climática para o Estado de Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 11; Reunião Latino Americana de Agrometeorologia, 2. 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia-SBA, 1999. 1CD-ROM.

CITADINI-ZANETTE, V.; BOFF, V.P. **Levantamento florístico em áreas mineradas a céu aberto na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil.** Florianópolis: Secretaria de Estado da Tecnologia, Energia e Meio Ambiente, 160p, 1992.

CITADINI-ZANETTE, V. Diagnóstico ambiental da região carbonífera no Sul de Santa Catarina: Recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão. **Rev. Tecnol. Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p. 51-62, 1999.

COLLARES, J. E. R. Mapa de Biomas do Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 57. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Botânica do Brasil, p. 306-309, 2006.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. **Perfil analítico do carvão.** 2 ed. Porto Alegre. 140 p, 1987. (Boletim, 6).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento de reconhecimento dos solos de Santa Catarina.** Boletim de Pesquisa, n.6, 721p, 1998.

EPAGRI - EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E DE EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. **Zoneamento agroecológico e socioeconômico do estado de Santa Catarina.** Florianópolis: EPAGRI, 1999. 1 CD ROM.

EPAGRI - EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E DE EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. **Dados e informações bibliográficas da unidade de planejamento regional litoral sul catarinense –UPR8.** Florianópolis: EPAGRI, 2001. 1 CD ROM.

FILGUEIRAS, T. S. et al. **Caminhamento: um método expedito para levantamentos florísticos qualitativos.** Rio de Janeiro, Cadernos de Geociências, n. 12, p. 39-43, 1994.

GASPER, A. L.; SAVEGNANI, L. **Lycophyta e samambaias do Parque Nacional da Serra do Itajaí, Vale do Itajaí, SC, Brasil.** Hoehnea, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 755-767, 2010.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manuais Técnicos em Geociências 1: **Manual técnico da vegetação brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE. 275p, 2012.

KAWAKAMI, J. **Samambaias e avencas. Manual de Floricultura**. IN: Simpósio Brasileiro de Floricultura e Plantas Ornamentais. Maringá, Paraná, p. 238-239, 1992.

KLEIN, A.S.; CITADINI-ZANETTE, V.; LOPES, R.P.; SANTOS, R dos. Regeneração natural em área degradada pela mineração de carvão em Santa Catarina, Brasil. **Rev. Esc. Minas**. vol.62 no.3 Ouro Preto July/Sept. 2009. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672009000300007>>. Acessado em agosto de 2014.

KRAMER, K.U. & GREEN, P.S. **The families and genera of vascular plants**. Vol. 1. Pteridophytes and gymnosperms. Springer-Verlag, Berlin. 1990.

KORNÁS, J. **Adaptative strategies of african pteridophytes to extreme environments**. Royal. Soc. Edinburgh, n.86B, p. 391-396, 1985.

LEHN, C. R.; LEUCHTENBERGER, C.; HANSEN, M. A. **Pteriófitas ocorrentes em dois remanescentes de Floresta Estacional Decidual no Vale do Taquari, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. Iheringia Série Botânica, Porto Alegre, v. 64, n. 1, p. 23-31. 2009.

LEHN, C.R.; ASSIS E.L. de. Riqueza de samambaias e licófitas de uma mata de galeria na região central do Mato Grosso do Sul, Brasil. **Biotemas**, v 26 n1 p.7, 26(1): 7-15. ISSN 2175-7925. Doi 10.5007/21757925, 2013.



MORAN, R.C. **Diversity, biogeography, and floristics**. In: Ranker, T.A. & Haufler, C.H. (eds.). *Biology and evolution of ferns and lycophytes*. Cambridge University Press, New York. p. 367-394, 2008.

NICOLEITE, E.R; CAMPOS, M.L; CITADINI-ZANETTE, V; SANTOS R. dos; MARTINS, R.; SOARES, C.R.F.S. **Mata Ciliar: Implicações técnicas sobre a restauração após mineração de carvão**. Criciúma: SATC, 80p, 2013.

PORTAL DA EDUCAÇÃO. **Pteridófitas**. Campo Grande: Portal da Educação, 117 p. isbn 978-85-8241-695-2, 2013.

PRADO, J.; SYLVESTRE, L.S. **Samambaias e Licófitas**. In: Forzza, R.C. et al. (eds.). *Catálogo de plantas e fungos do Brasil*. Vol. 1. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Pp. 522-567, 2010.

PONCE, M. M. **Revisión de las Thelypteridaceae (Pteridophyta) argentinas**. Darwiniana, San Isidro, v. 28, p. 317-390, 1987.

ROTHFELS, C.J.; SUNDUE, M.A.; KUO, LI-Y.; LARSSON, A.; KATO, M.; SCHUETTPELZ, E. & PRYER, K.M. **A revised family-level classification for eupolypod II ferns (Polypodiidae: Polypodiales)**. *Taxon* 61(3): p. 515–533, 2012.

SALVADOR, E. D.; PASQUAL, M.; SPERA, M. R. N. Efeito de diferentes substratos no crescimento de samambaia-matogrossense (*Polypodium aureum* L.). **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.25, n.4, p.1006-1011, 2001.

SANTA CATARINA. GABINETE DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. **Sub-chefiadeestatística, geografia e informática**. IBGE, 1986.

SANTIAGO, A.C.P.; BARROS, I.C.L. Pteridoflora do Refúgio Ecológico Charles Darwin (Igarassu, Pernambuco, Brasil). **Acta Botânica Brasílica** 17(4): p. 597-604, 2003.

SCHWARTSBURD, P.B., & LABIAK, P.H. **Pteridófitas do Parque Estadual de Vila Velha, Ponta Grossa, Paraná, Brasil**. Hoehnea 34(2): p. 159-209, 2007.

SENNA, R.M; WAECHTER, J.L. **Pteridófitas de uma floresta com araucária. 1. Formas biológicas e padrões de distribuição geográfica**. Iheringia. Série Botânica, v.48, p.41-58, 1997.

SMITH, A.R.; PRYER, K.M.; SCHUETTPELZ, E.; KORALL, P.; SCHNEIDER, H. & WOLF, P.G. **A classification for extant ferns**. Taxon 55(3): 705-731, 2006.

SMITH, A.R.; PRYER, K.M.; SCHUETTPELZ, E.; KORALL, P.; SCHNEIDER, H. & WOLF, P.G. **Fern classification**, p.

417-467. In: T.A. Ranker & C.H. Haufler (Eds.), *Biology and evolution of ferns and lycophytes*. Cambridge University Press, 2008.

TEIXEIRA, M. B. **Vegetação e Uso Atual do Solo de Criciúma – SC**. Porto Alegre: CPRM, 20 p, 1994.

TRYON, R.M. & TRYON, A.F. **Ferns and allied plants with special reference to Tropical America**. New York, Springer Verlag. 897p, 1982.

## **6   CAPITULO II**

### **RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE SAMAMBAIAS E LICÓFITAS E O TEOR DE ELEMENTOS-TRAÇO EM ÁREAS DE BOTA-FORA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO EM SANTA CATARINA, SUL DO BRASIL**

#### **RESUMO**

Na bacia carbonífera de Santa Catarina, a mineração de carvão iniciada em no século XVIII, trouxe o desenvolvimento socioeconômico da região, mas também inúmeros problemas ambientais que impactaram negativamente os recursos naturais na zona de exploração do minério. A principal fonte geradora desse impacto foi a disposição inadequada de rejeito e estéreis ricos em sulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$  pirita), que oxidam-se em presença de ar e água gerando drenagens ácidas de minas (DAM), comumente associadas à dissolução de elementos-traço em depósitos de rejeitos e estéreis e em minas abandonadas, denegrindo a qualidade do ecossistema local. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização química e a determinação dos teores de elementos-traço Cd, Ni, Pb e Zn, no rejeito e estéreis da mineração de carvão relacionando-os com a presença de samambaias e licófitas nas áreas de bota-fora de carvão. O trabalho foi realizado em 23 depósitos de rejeito e estéreis distribuídos em 06 municípios da bacia carbonífera, Criciúma, Forquilha, Lauro Müller, Siderópolis, Treviso e Urussanga. Foram coletadas amostras de rejeito e estéril e as espécies de samambaias e licófitas existentes em cada local. Posteriormente, realizou-se a caracterização do material através da análise dos atributos químicos e físico, pH em água, pH em

KCl, teores de Ca, Mg, P, K, Na, Mn, Fe, Al, argila e matéria orgânica. Para a análise dos teores totais dos elementos-traço Cd, Pb, Ni e Zn, procedeu-se a determinação em espectrometria de absorção atômica. Foram coletados um exemplar de cada espécie de samambaia e licófitas existente através de caminhamento por toda a extensão dos depósitos, sendo estas identificadas e exsiccadas no Herbário LUSC da UDESC/CAV e ao Herbário CRI da UNESC. Concluiu-se que o rejeito e estéril da mineração é pobre quimicamente e apresenta grande variação provavelmente influenciado pelo processo de DAM. Os teores totais dos elementos-traço Cd, Ni e Zn ficaram abaixo dos valores de prevenção estabelecidos pela resolução CONAMA 420/2006 e os teores totais de Pb ficaram acima do valor de prevenção em quatro depósitos. A ocorrência das espécies de samambaias e licófitas nos depósitos pode ter relação direta com a idade de formação dos mesmos, sendo *Pteridium arachnoideum* (Kaulf) Maxon. e *Pityrogramma calomelanos* (L.) as espécies predominantes nos depósitos.

**Palavras-chaves:** Rejeito e estéreis. Degradação ambiental. Drenagem ácida de mina. Recuperação ambiental. Plantas vasculares sem semente.

## **CHAPTER II**

### **RELATIONSHIP BETWEEN THE PRESENCE OF FERNS AND LYCOPHYTES AND THE CONTENT OF TRACE ELEMENTS IN AREAS OF COAL MINING BOOT-OUT IN SANTA CATARINA, BRAZIL SOUTH**

#### **ABSTRACT**

In the coal basin of Santa Catarina, coal mining began in the eighteenth century, brought the socioeconomic development of the region, but also numerous environmental problems that negatively impacted natural resources in the mineral exploration area. The main source of this impact was the improper disposal of waste and barren rich in iron sulfide ( $\text{FeS}_2$  pyrite), which oxidize in the presence of air and water generating acid mine drainage (AMD), commonly it associated with the dissolution elements- trace in deposits of tailings and barren and abandoned mines, denigrating the quality of the local ecosystem. In this context, this study aimed to carry out the chemical characterization and the determination of the levels of trace elements Cd, Ni, Pb and Zn in the waste and barren of coal mining relating them to the presence of ferns and lycophytes areas the send-off of coal. The study was conducted in 23 deposits of tailings and sterile distributed in 06 municipalities in the coal basin, Criciúma, Forquilha, Lauro Müller, Siderópolis, Treviso and Urussanga. Samples were collected from tailings and waste and species of ferns and lycophytes at each location. Subsequently, we carried out the characterization of materials by analyzing the physical and chemical attributes, pH, pH KCl, Ca, Mg, P, K, Na, Mn, Fe, Al, clay and organic matter. For the analysis of total content of trace elements Cd, Pb, Ni and Zn, proceeded to the determination by atomic absorption spectrometry. They

collected a specimen of each species of fern and licófitas existing pathway through the length of the deposits, which are identified and in the Herbarium exsiccatae LUSC UDESC / CAV and Herbarium CRI of UNESC. It was concluded that the tailings and waste mining is poor chemically and shows great variation probably influenced by the DAM process. The total concentration of trace elements Cd, Ni and Zn were below the values of prevention established by Resolution CONAMA 420/2006 and total Pb contents were above the value of prevention in four deposits. The occurrence of the species of ferns and lycophytes in deposits can be directly related to the age of formation thereof, being *Pteridium arachnoideum* (Kaulf) Maxon. and *Pityrogramma calomel* (L.) the predominant species in deposits.

**Key-words:** Waste and barren. Environmental degradation. Acid mine drainage. Environmental recovery. Vascular plants without seeds.

## 6.1 INTRODUÇÃO

A mineração de carvão trouxe para a região sul de Santa Catarina desenvolvimento econômico e social, permitindo o surgimento de outros setores industriais como a indústria cerâmica, plástica e a química. Contudo, as atividades de extração, beneficiamento, transporte e a estocagem dos rejeitos e estéreis da mineração, ao longo dos anos, acarretaram a contaminação dos recursos naturais (BRAGA et al., 2014).

Para cada tonelada lavrada de carvão, eram gerados cerca de 60% de resíduos sólidos (rejeitos e estéreis) que foram depositados de maneira inadequada em pilhas ou barragens em torno da área minerada (NASCIMENTO et al., 2002; CAMPOS et al., 2010). Esses materiais são ricos em sulfeto de ferro (pirita  $\text{FeS}_2$ ), além de outros minerais sulfetados, que quando em contato com a água e o ar atmosférico sofrem reações de oxidação formando compostos químicos altamente ácidos, susceptíveis à lixiviação (TORREZANI; OLIVEIRA, 2013), responsáveis pelo processo de drenagem ácida de mina (DAM), principal impacto ambiental nas áreas mineradas.

A DAM caracteriza-se pelo baixo pH ( $\leq 3$ ), presença de Al, Fe, Mn e elementos-traço As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Hg (MUNIZ, 2009) em composições e concentrações que dependem da cinética dos processos geoquímicos (ROBERTSON, 1994), da mineralogia, do tipo e da quantidade do sulfeto oxidado, da temperatura, da ação de bactérias do gênero *Thiobacillus*, entre outros, específicos de cada ambiente que condicionam os níveis de contaminação, podendo permanecer ativos por décadas e até mesmo por séculos após a sua produção (MUNIZ, 2009).

Em muitas áreas rurais que fazem parte dos municípios integrantes da bacia carbonífera catarinense, as atividades de extração do carvão e a posterior formação de depósitos de rejeito e estéreis a céu aberto já causaram uma série de danos



ambientais que levaram a desmatamentos florestais, contaminação de rios e nascentes e a infertilidade do solo (UNESC, 1998; COLONETTI, 2009).

Apesar da perturbação e hostilidade do ambiente de um depósito de rejeito e estéril, existem plantas que são capazes de sobreviver nestes locais, como algumas espécies de samambaias e licófitas, iniciando um processo de regeneração natural, desempenhando funções importantes, uma vez que iniciam a colonização criando condições para outras espécies se instalarem. Essas plantas são fortemente resistentes a ambientes degradados, por serem pouco exigentes em fertilidade do solo, sobreviver por longos períodos de estiagem e suportar bem as adversidades ambientais (MORAN, 2008; PRADO; SYLVESTRE, 2010).

O conhecimento das espécies de samambaias e licófitas capazes de habitar os depósitos de rejeito e estéreis é de suma importância, pois além da sua rusticidade, são plantas nativas da região e podem integrar projetos de recuperação ambiental impulsionando a reestruturação do ecossistema local.

Diante do exposto o objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização química e a determinação dos teores de elementos-traço Cd, Ni, Pb e Zn no rejeito e estéreis da mineração de carvão relacionando esses teores com a presença das espécies de samambaias e licófitas nas áreas de bota-fora de carvão.

## 6.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.2.1 Área de estudo

O presente trabalho foi conduzido em áreas de depósitos de rejeito e estéreis em 06 municípios da na Bacia Carbonífera Catarinense integrantes da Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC).

A geologia da região enquadra-se no Grupo Guatá que engloba sedimentos não-glaciais e camadas de carvão, constituindo-se por duas formações, a Rio Bonito (inferior) de origem fluvial, lacustre, palustre, com seção arenosa (basal), argilosa (intermediária) e areno-argilosa (superior) contendo camadas de carvão; e a formação Palermo (superior), formada por sítios arenosos, siltitos e folhelhos silticos. A unidade geomorfológica denomina-se Bacia Carbonífera Catarinense e ocupa uma área de 1.659 km<sup>2</sup>, situada no extremo sul do estado em uma faixa alongada na direção N-S. Os solos representativos da região são os Argissolos correspondendo com 43,1% e os Cambissolos presentes em 24,22%. (BACK, 2009).

A constituição mineralógica do carvão catarinense é bem diversificada, tendo como principais minerais presentes no rejeito o quartzo, caulinita, gesso, muscovita, K- feldspato e em menor proporção a albita, barita, brucita, calcita, marcassita, mulita, oligonite, siderita, esfalerita, ilmenita, talco, zircão e outros (SILVA; OLIVEIRA 2010; SILVA, 2011 a) além de uma ampla gama de minerais (sulfetos) ferrosos como a ankerita, ilita, jarosita, pirita e os óxidos de ferro hematita, a maghemita, magnetita, goetita, magnesioferrita, ferrita de cálcio (MACHADO et al., 2012) e hidróxido-silicatos de Al como a gibbsita (RIGOL et al., 2009).

O clima predominante da região, segundo Koppen, é classificado como Cfa (Mesotérmico, úmido e com verões quentes) com variações significativas na precipitação e temperatura. Mais especificamente, de acordo com o Zoneamento Agroecológico de Santa Catarina (EPAGRI, 1999) que adota o zoneamento baseado em combinações de vegetação, geomorfologia e características climáticas, conforme Braga e Ghellere (1999), para os municípios da região AMREC abrangidos neste estudo, tem-se clima do tipo

Cfa para Criciúma, Forquilha e Urussanga e clima do tipo Cfa e Cfb para Lauro Muller, Siderópolis e Treviso.

A temperatura e a precipitação média anual para os municípios com clima predominante do tipo Cfa varia de 17-19,3<sup>0</sup>C e 1220-1660 mm e para os municípios com clima do tipo Cfa e Cfb a variação é de 11,4-19,3<sup>0</sup>C e 1220-1820 mm, respectivamente. Em geral a umidade relativa média mensal é superior a 80% e o número de geadas é de 0,3-11 para os municípios com clima do tipo Cfa e de 0,3-36 para os municípios com clima do tipo Cfa e Cfb (BACK, 2009).

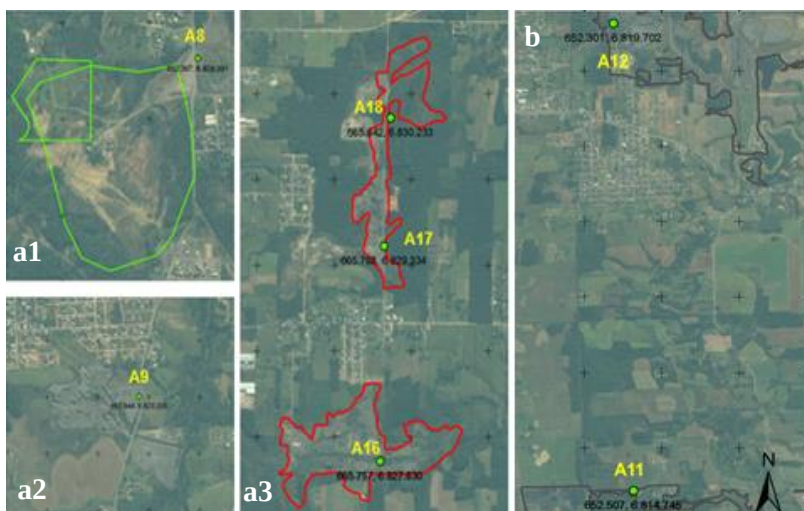
A vegetação do estado de Santa Catarina pertence ao Bioma Mata Atlântica, que compreende diversas fitofisionomias que propiciaram significativa diversidade ambiental (COLLARES, 2006). Neste bioma está incluída a Floresta Ombrófila Densa, situada em todo litoral, entre o planalto da Serra Geral e o oceano Atlântico, em altitude de 5 a 1.000 metros (SANTA CATARINA, 1986). Na Floresta Ombrófila Densa, pode-se observar quatro formações distintas: Floresta das Terras Baixas, Submontana, Montana e Altomontana. Na região de estudo estão presentes duas formações pertencentes a este bioma as chamadas Terras Baixas e Submontana, distintas de acordo com a altitude de ocorrência. A formação das Terras Baixas localiza-se entre 5 e 30 m de altitude e a Submontana tem altitude entre 30 e 400 m acima do nível do mar (IBGE, 2012).

As áreas de estudo abrangeram seis municípios da região carbonífera, sendo eles: Criciúma, Forquilha, Lauro Muller, Siderópolis Treviso e Urussanga (ver Figura13). Os critérios utilizados para a escolha destas áreas devem-se ao fato de serem locais com influencia significativa das atividades de mineração de carvão, com inúmeros depósitos de rejeito e estéreis, inutilizados pela degradação causada pela atividade carbonífera.

O trabalho abrangeu 23 áreas com interferência da atividade carbonífera (depósitos de rejeitos e estéreis) e 04

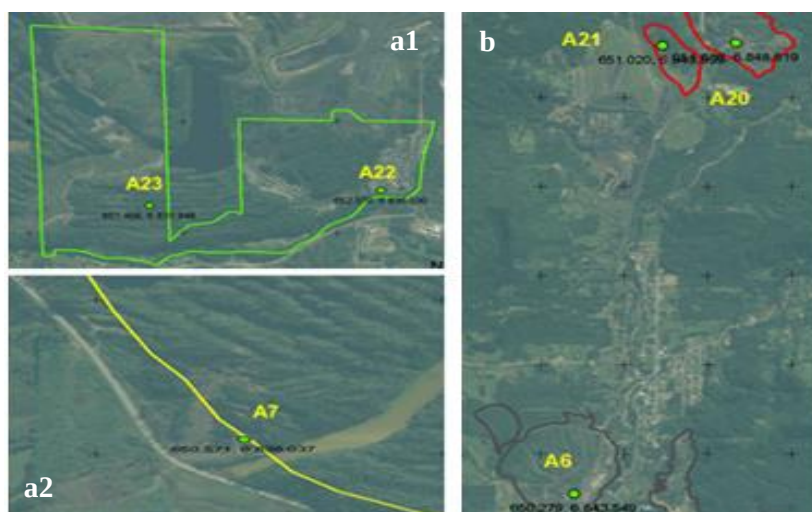


Figura 14 – Mapas de localização dos depósitos de rejeito e estéreis nos municípios de Criciúma (a1) (a2) e (a3) e Forquilha (b).



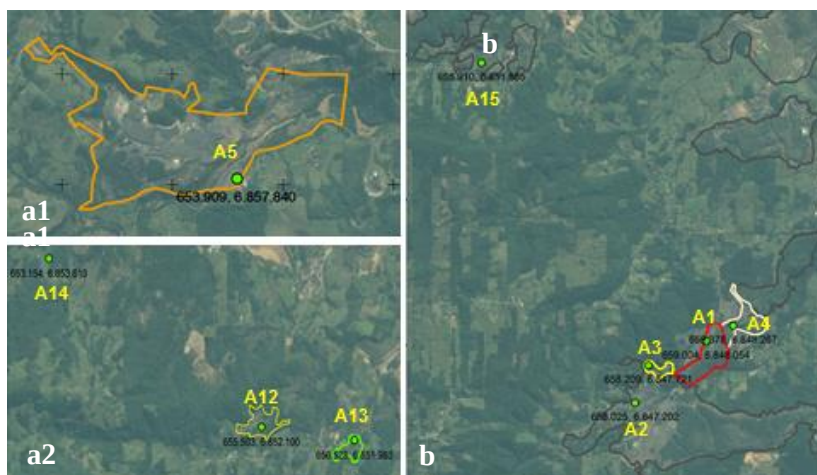
Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Mapas de localização dos depósitos de rejeito e estéreis nos municípios de Siderópolis (a1) e (a2) e Treviso (b).



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Mapas de localização dos depósitos de rejeito e estéreis nos municípios de Lauro Muller (a1) e (a2) e Urussanga (b).



Fonte: Próprio autor.

## 6.2.2 Características gerais da área de estudo

Segundo informações do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (não publicadas) a idade aproximada de formação dos depósitos, até o ano da coleta, variava entre 32 e 52 anos (ver Quadro 2), estando os mesmos localizados nas zonas rurais dos municípios de estudo, em locais abertos tendo em seu entorno vegetação típica da região. Com o tempo as espécies mais resistentes dessa vegetação avançaram para o interior dos depósitos resultando em uma composição de plantas de porte baixo, em sua maioria gramíneas e herbáceas, que se desenvolvem bem nas condições inóspitas do ambiente, como o grupo das samambaias e licófitas objeto desse estudo.

Até o momento da coleta não se tinham indícios de recuperação nos depósitos, apenas naqueles localizados no

município de Siderópolis, que segundo informações do DNPM (não publicadas) já haviam passado por processo de recuperação no ano de 2005. Entretanto, foram considerados para o estudo, pois ainda existia rejeito misturado ao solo utilizado para recuperação, bem como no caso do depósito A7, o recebimento de efluentes provenientes de cavas ativas e inativas localizadas no entorno do mesmo além de rejeito.

Os depósitos estudados são provenientes de um carvão classificado como betuminoso alto volátil C, que devido suas características mineralógicas e tecnológicas, é considerado de baixa qualidade, principalmente, em relação aos altos percentuais de cinzas e enxofre e os baixos teores de materiais voláteis quando comparado a outros carvões produzidos no mundo (REDIVO, 2002).

Quadro 2 - Descrição das áreas de estudo na região carbonífera de Santa Catarina. (Continua).

| <b>Município</b> | <b>ID campo</b> | <b>Idade estimada**</b> | <b>ID área*</b>               | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                        |
|------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Urussanga        | <b>A1</b>       | 32 anos                 | Setor Santana Encosta área 3  | Dois ambientes: (1º) Depósito de finos e ultrafinos de carvão; (2º) depósito de estéril.                                                                                |
|                  | <b>A2</b>       | 32 anos                 | Barranco de beira de estrada  | Depósito de estéril.                                                                                                                                                    |
|                  | <b>A3</b>       | 32 anos                 | Setor Santana Plano II Área 4 | Deposito de finos e ultrafinos de carvão.                                                                                                                               |
|                  | <b>A4</b>       | 32 anos                 | Setor Santana Poço 8 área I   | Depósito de estéril.                                                                                                                                                    |
|                  | <b>A15</b>      | 32 anos                 | Céu Aberto                    | Mineração a céu aberto. Ausência de práticas de construção topografia e de solo. Presença de rejeito e estéril.                                                         |
|                  | <b>AT2</b>      | -                       | Testemunha                    | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                           |
|                  | <b>AT3</b>      | -                       | Testemunha                    | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                           |
|                  | <b>AT4</b>      | -                       | Testemunha                    | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                           |
| Treviso          | <b>A6</b>       | 52 anos                 | Céu Aberto                    | Mineração a céu aberto. Dois ambientes: (1º) Ausência de práticas de construção topografia e de solo. Depósito de estéril. (2º) Depósito de fino e ultrafino de carvão. |
|                  | <b>A20</b>      | 52 anos                 | Área União                    | Depósito de estéril.                                                                                                                                                    |
|                  | <b>A21</b>      | 52 anos                 | Área União                    | Depósito de rejeito-piritoso, mistura de solo e fragmentos de                                                                                                           |



| <b>Município</b> | <b>ID camp<br/>o</b> | <b>Idade<br/>estimada**</b> | <b>ID área*</b>     | <b>Descrição</b>                                                                                                                                              |
|------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                      |                             |                     | rocha.                                                                                                                                                        |
| Siderópolis      | <b>A7</b>            | 42 anos                     | Língua do Dragão    | Depósito de fino e ultrafino. Atualmente recebe efluentes de outras cavas localizadas ao redor.                                                               |
|                  | <b>A19</b>           | 42 anos                     | Céu aberto          | Mineração a céu aberto. Ausência de práticas de construção topografia e de solo. Presença de estéril.                                                         |
|                  | <b>A22</b>           | 42 anos                     | Mina do Trevo       | Mineração a céu aberto com presença de uma pequena camada de “solo” na superfície cobrindo rejeito- piritoso.                                                 |
|                  | <b>A23</b>           | 42 anos                     | Mina do Trevo       | Mineração a céu aberto com presença de uma pequena camada de “solo” na superfície cobrindo rejeito – piritoso.                                                |
|                  | <b>AT1</b>           | -                           | <b>Testemunha</b>   | Barranco de beira de estrada.                                                                                                                                 |
| Criciúma         | <b>A8</b>            | 42 anos                     | Bairro Colonial     | Depósito de estéril.                                                                                                                                          |
|                  | <b>A9</b>            | 42 anos                     | Bairro Santa Luzia  | De Depósito de estéril. Deposição de resíduo sólido urbano                                                                                                    |
|                  | <b>A16</b>           | 42 anos                     | Setor Linha Batista | Dois ambientes: (1º) Depósito de estéril. (2º) Depósito de fino e ultrafino de carvão. Ocorrência de resíduos sólidos urbanos.                                |
|                  | <b>A17</b>           | 42 anos                     | Setor Linha Batista | Dois ambientes: (1º) Depósito de estéril. (2º) Depósito de fino e ultrafino de carvão. Ocorrência de resíduos sólidos urbanos.                                |
|                  | <b>A18</b>           | 42 anos                     | Setor Linha Batista | Depósito de estéril. Presença de DAM, fragmento de rocha e pirita; lago intermitente formado pela contribuição da precipitação com água de coloração azulada. |
| Forquilha        | <b>A10</b>           | 52 anos                     | Depósito de rejeito | Deposição de fino e ultrafino de carvão.                                                                                                                      |

| <b>Município</b> | <b>ID<br/>camp<br/>o</b> | <b>Idade<br/>estimada**</b> | <b>ID área*</b>     | <b>Descrição</b>                                                                                                                        |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | <b>A11</b>               | 52 anos                     | Depósito de rejeito | Bacia de decantação de fino e ultrafino de carvão com presença de pequenas lagoas com água avermelhada e nas margens ocorrência de DAM. |
| Lauro Muller     | <b>A5</b>                | 40 anos                     | Rocinha             | Depósito de rejeito-piritoso.                                                                                                           |
|                  | <b>A12</b>               | 40 anos                     | ÁREA 10             | Depósito de estéril.                                                                                                                    |
|                  | <b>A13</b>               | 40 anos                     | ÁREA 4              | Depósito de estéril.                                                                                                                    |
|                  | <b>A14</b>               | 40 anos                     | Céu aberto          | Depósito de estéril.                                                                                                                    |

\*Identificação dos depósitos de acordo com a nomenclatura do Ministério Público Federal de Criciúma/SC.

\*\*Idade estimada dos depósitos fornecidas pelo DNPM de Criciúma/SC; e calculada até o ano de realização das coletas, 2012.

Fonte: Próprio autor. (Conclusão).

### 6.2.3 Amostragem e análise das amostras

As atividades de campo foram realizadas ao longo do ano de 2012, com uma coleta em cada um dos 23 depósitos e em cada uma das 04 áreas de testemunha. Nessas coletou-se as espécies de samambaias e licófitas existentes e o rejeito, o estéril ou o solo do entorno de cada planta, por meio de caminhamento (FILGUEIRAS et al., 1994). Para auxiliar nas coletas foram utilizadas pás retas e curvas removendo-se a planta por completo abrangendo o entorno da raiz preservando suas estruturas vegetativas e reprodutivas. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos devidamente identificados mantidos abertos para evitar modificações abruptas na conformação do material e para conservação do material.

O aparato foi conduzido para UDESC/CAV, onde realizou-se o processamento no Laboratório de Levantamento e Análise Ambiental. Separou-se o rejeito, o estéril e o solo das plantas, secando-os em estufa por 24 horas a 60°C; posteriormente foram moídos e passados em peneira de 2 mm. Em seguida, para a caracterização do material procederam-se análises dos atributos químicos, pH em água, utilizando-se uma relação solo/solução de 1:1, teores de P, K pelo método Mehlich, Ca, Mg, Al com solução KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e os teores de argila e matéria orgânica de acordo com a metodologia de Tedesco et al. (1995). Para a determinação do pH em KCl adotou-se o método proposto por EMBRAPA (1997). A quantificação foi realizada em espectrômetro de absorção atômica.

Subsequentemente, foram determinados os teores totais de Cd, Pb, Ni e Zn, seguindo o protocolo USEPA (1994), método 3051. Cada uma das amostras foi moída em almofariz de ágata e passada em peneira de 0,10 mm; as amostras ~0,25g foram submetidas a digestão por meio de ataque ácido (6 mL

de  $\text{HNO}_3$ ) em tubos de Teflon® PTFE, hermeticamente fechados em forno de micro-ondas por 1 hora e 30 minutos. Realizaram-se duas repetições de laboratório. Após a digestão e filtragem, completou-se o volume para 10 mL de água ultra pura, sendo a solução ácida armazenada em tubos falcon de 15 mL. Em cada bateria de digestão foram incluídas amostras-controle, NIST SRM 2709 San Joaquine duas provas em branco utilizadas para o cálculo do Limite de Detecção Qualitativo do Método Analítico (LDQM) (ver Tabela 1)

Tabela 1 - Valores certificados e recuperados dos elementos-traço da amostra referência NIST SEM 2709 San Joaquine e Limite de detecção e quantificação operacionais, LDO e LQO, respectivamente.

| Elemento  | NIST SEM<br>2709<br>certificado | NIST SEM<br>2709<br>recuperado | LDO    | LDQ    |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|--------|--------|
|           |                                 | mg Kg <sup>-1</sup>            |        |        |
| <b>Cd</b> | 0,31 ± 0,002                    | 109,90                         | 0,2113 | 0,6338 |
| <b>Pb</b> | 29 ± 0,1                        | 95,37                          | 0,0718 | 0,2162 |
| <b>Ni</b> | 85 ± 2                          | 79,45                          | 0,0377 | 0,1131 |
| <b>Zn</b> | 103 ± 4                         | 85,90                          | 0,0093 | 0,2817 |

Fonte: Próprio autor.

Os teores totais de Pb, Ni e Zn foram quantificados por espectrômetro de absorção atômica, com atomização em chama ar-acetileno. Os teores totais de Cd foram quantificados pelo mesmo equipamento, porém com atomização eletrotérmica, tendo como modificador químico o uso de 1g de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  em 0,5 mol L<sup>-1</sup>  $\text{HNO}_3$  (RUCANDIO; PETIT, 1999).

As plantas foram secas em estufa e exsiccadas sendo que para delimitação de famílias, gêneros e espécies das samambaias (monilófitas) seguiu-se a classificação proposta por Smith et al. (2006, 2008), com revisão de Rothfels (2012) e

para as licófitas seguiu-se a classificação de Kramer e Green (1990). O material foi catalogado e incorporado aos acervos do Herbário LUSC da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CAV) e do Herbário CRI da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

A análise estatística dos resultados foi conduzida em duas fases. Inicialmente, os dados foram submetidos à uma análise descritiva, objetivando a caracterização das distribuições de frequências das variáveis e a identificação de pontos discrepantes. A seguir procedeu-se a uma análise de variância univariada para o efeito do fator áreas sobre as variáveis teores de cádmio, chumbo, níquel e zinco. Para o atendimento das pressuposições de normalidade e homogeneidade de variância houve necessidade da aplicação da transformação logarítmica a essas variáveis. Para essas análises adotou-se um delineamento inteiramente casualizado, com as médias sendo comparadas através do teste de Scott-Knott. Também se procedeu a análise de agrupamento das áreas de acordo com a presença/ausência das espécies observadas. As distâncias multivariadas entre as áreas foram determinadas com base no índice de Jaccard e o algoritmo de aglomeração utilizado baseou-se na distância média (UPGMA) entre "clusters". Nos testes foi adotado o nível mínimo de significância de 5 %. Todas as análises foram conduzidas com o auxílio do software SAS® (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, 2003) e do software R (R CORE TEAM, 2013).

## 6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.3.1 Caracterização química do rejeito e estéril

O resultado da análise de caracterização química dos rejeitos ressalta o principal problema decorrente da formação destes ambientes, a geração de drenagem ácida de mina

(DAM), que ocorre sem controle nestes locais, promovendo a inutilização do solo e dos mananciais. O rejeito apresenta baixo pH e baixos teores de elementos como Ca, Mg, K, Na e Mn (para a maioria dos depósitos); altos teores de P, Al e Fe trocável; valores baixos de argila que indicam uma textura friável, baixos índices de soma de bases e altos teores de matéria orgânica. Dos 23 depósitos avaliados apenas o A23 possui propriedades químicas diferenciadas (ver Tabela 2).

Tabela 2 - Caracterização do rejeito e estéril da mineração de carvão nos 23 depósitos e caracterização do solo nas 04 áreas sem contaminação (testemunhas), da Bacia Carbonífera Catarinense. Média dos valores. (Continua).

| Dep | pH<br>água | pH<br>KCl | Ca  | Mg  | K                                  | Na  | SB  | Al  | P    | Fe                  | Mn   | MO                 | Ar. |
|-----|------------|-----------|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|------|---------------------|------|--------------------|-----|
|     |            |           |     |     | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |     |     |     |      | mg kg <sup>-1</sup> |      | g kg <sup>-1</sup> |     |
| A1  | 2,8        | 2,8       | 3,2 | 0,1 | 1,0                                | 0,1 | 4,5 | 7,3 | 3,3  | 130,1               | 0,8  | 56                 | 180 |
| A2  | 3,2        | 2,6       | 3,7 | 0,2 | 0,2                                | 0,1 | 4,2 | 4,6 | 1,5  | 251,5               | 0,2  | 54                 | 190 |
| A3  | 3,0        | 2,7       | 6,3 | 0,1 | 0,1                                | 0,1 | 6,7 | 7,3 | 2,1  | 230,0               | 0,2  | 46                 | 140 |
| A4  | 2,6        | 2,1       | 4,4 | 0,1 | 0,1                                | 0,1 | 4,6 | 5,8 | 1,2  | 302,2               | 0,2  | 36                 | 150 |
| A5  | 2,7        | 2,5       | 5,7 | 0,1 | 0,1                                | 0,1 | 6,0 | 7,0 | 3,2  | 187                 | 0,2  | 56                 | 150 |
| A6  | 2,6        | 2,7       | 4,0 | 0,1 | 0,1                                | 0,2 | 4,3 | 7,9 | 2,1  | 305,7               | 2,6  | 40                 | 180 |
| A7  | 2,5        | 2,4       | 3,6 | 0,1 | 0,1                                | 0,1 | 3,9 | 5,2 | 2,7  | 315,9               | 4,4  | 93                 | 190 |
| A8  | 3,2        | 3,0       | 4,7 | 0,1 | 0,1                                | 0,2 | 5,0 | 5,3 | 1,5  | 233,9               | 3,1  | 37                 | 340 |
| A9  | 2,2        | 2,4       | 3,2 | 0,1 | 0,1                                | 0,1 | 3,5 | 9,7 | 2,5  | 289,8               | 1,9  | 93                 | 400 |
| A10 | 2,8        | 2,9       | 6,3 | 0,3 | 0,4                                | 0,3 | 7,3 | 9,1 | 21,4 | 310,6               | 11,9 | 61                 | 240 |
| A11 | 3,0        | 2,8       | 4,9 | 0,1 | 0,1                                | 0,2 | 5,3 | 8,0 | 1,9  | 262,7               | 5,2  | 24                 | 240 |
| A12 | 3,0        | 2,8       | 3,7 | 0,2 | 0,1                                | 0,1 | 4,1 | 9,5 | 2,7  | 248,5               | 0,2  | 30                 | 180 |

| Dep                                | pH<br>água | pH<br>KCl | Ca   | Mg  | K   | Na  | SB                  | Al   | P    | Fe                 | Mn   | MO | Ar. |
|------------------------------------|------------|-----------|------|-----|-----|-----|---------------------|------|------|--------------------|------|----|-----|
| cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |            |           |      |     |     |     | mg kg <sup>-1</sup> |      |      | g kg <sup>-1</sup> |      |    |     |
| A13                                | 3,3        | 2,8       | 2,7  | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 3,1                 | 7,6  | 1,6  | 237,2              | 2,6  | 39 | 240 |
| A14                                | 3,1        | 2,7       | 4,0  | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 4,5                 | 4,9  | 10,0 | 144,5              | 5,5  | 31 | 225 |
| A15                                | 3,0        | 2,9       | 2,4  | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 2,7                 | 6,4  | 8,0  | 214,1              | 7,8  | 18 | 220 |
| A16                                | 2,8        | 2,9       | 5,3  | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 5,7                 | 10,2 | 2,6  | 270,3              | 9,9  | 24 | 220 |
| A17                                | 3,4        | 3,2       | 3,5  | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 4,3                 | 7,7  | 23,8 | 47,1               | 5,5  | 18 | 270 |
| A18                                | 3,1        | 3,0       | 3,5  | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 4,0                 | 6,7  | 1,45 | 169,3              | 1,0  | 29 | 190 |
| A19                                | 3,2        | 2,9       | 3,3  | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 3,7                 | 7,8  | 1,0  | 174,0              | 10,3 | 36 | 240 |
| A20                                | 3,3        | 3,3       | 3,8  | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 4,3                 | 11,3 | 2,3  | 126,8              | 19,1 | 15 | 300 |
| A21                                | 3,0        | 2,7       | 3,9  | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 4,5                 | 6,9  | 6,3  | 188,3              | 8,4  | 18 | 200 |
| A22                                | 2,8        | 2,7       | 3,1  | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 3,2                 | 4,1  | 12,4 | 369,4              | 16,8 | 26 | 220 |
| A23                                | 5,3        | 5,5       | 33,4 | 3,0 | 0,1 | 0,2 | 36,8                | 1,9  | 81,9 | 151,0              | 44,8 | 44 | 220 |
| AT1                                | 4,2        | 5,8       | 6,9  | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 7,6                 | 4,1  | 3,6  | 256,4              | 48,3 | 21 | 380 |
| AT2                                | 4,3        | 3,9       | 4,5  | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 5,0                 | 1,5  | 2,3  | 86,7               | 23,1 | 18 | 190 |
| AT3                                | 4,0        | 3,5       | 4,3  | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 4,9                 | 7,2  | 3,2  | 156,2              | 73,3 | 17 | 290 |
| AT4                                | 4,1        | 3,6       | 4,5  | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 5,0                 | 4,0  | 3,3  | 174,6              | 47,1 | 16 | 220 |

SB = Soma de bases; MO = matéria orgânica; Ar = argila.

Fonte: Próprio autor. (Conclusão)



Os baixos índices de pH podem ser explicados pela presença de minerais sulfetados como a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), contida no rejeito e estéril dos depósitos, que oxida-se originando a DAM, produzindo ácido sulfúrico e provocando a queda do pH (OLIVEIRA et al., 2012). Silva et al (2011 a), em trabalho realizado com CCR (*resíduo da combustão do carvão*) em Santa Catarina relata que, a constituição mineralógica dos carvões catarinenses é bastante diversificada, encontrando como um dos minerais principais a pirita, além de formas secundárias do mesmo como a jarosita e a marcassita. Silva e Oliveira (2010) e Braga et al. (2014), também encontraram composição similar nos rejeitos dos carvões catarinenses.

Os baixos teores de Ca, Mg e K podem revelar a pobreza desses no material ou a perda dos mesmos por lixiviação. Isso ocorre devido ao intemperismo dos minerais contidos no rejeito provocado pela DAM, liberando os cátions metálicos que permanecem em solução, sendo transportados por grandes distâncias (MELLO et al., 2014). Além disso, a reação de oxidação de sulfetos libera cargas substanciais de  $\text{SO}_4^{2-}$ , que podem associar-se aos cátions Ca, K, Mg, Cl e Al sendo perdidos por lixiviação (SILVA et al., 2011 a), podendo o K também precipitar na forma de jarosita (BARNHISEL et al., 1982). O P apresentou teores altos na maioria dos depósitos que podem ser atribuídos a formação de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio pelo processo de drenagem ácida, adsorvendo-o especificamente (DANIELS, 1996; CAMPOS et al., 2010).

Os teores de Mn quantificados são bastante variáveis demonstrando valores altos em alguns depósitos e baixos em outros (ver Tabela 2). Isso pode estar relacionado com a mobilidade do elemento, considerada alta em amplas faixas de pH. Nos depósitos onde a concentração é maior pode estar ocorrendo a influência do íon Fe predominante nas drenagens ácidas que reduz a capacidade de oxidação do Mn para formas

trivalente ou tetravalente que em seguida precipitam-se na forma de óxidos (CAMPANER e SILVA, 2009), ocorrendo o inverso nos depósitos onde os teores de Mn são baixos, podendo estar lixiviando com o anión  $\text{SO}_4^{2-}$ . Yue e Zhao (2008) revelam que a concentração de Mn no lixiviado aumenta com a oxidação da pirita devido a alta correlação com o  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Os teores de Fe e Al trocável são considerados altos, apresentando variabilidade entre os depósitos. Esses valores são consequência da presença de minerais de ferro e alumínio no rejeito (BRAGA et al., 2014), do processo de DAM que provoca a queda brusca do pH aumentando as formas solúveis dos elementos, bem como do tempo de exposição do rejeito que determina a ocorrência deste processo (DAM).

Sánchez-Espanã (2006) relata que as formas livres de Fe e Al ocorrem apenas em condições extremamente ácidas ( $\text{pH} < 1$ ), enquanto que a complexação com os metais é dominante em pH que varia 1-4,5 para o Fe e 1,5-6 para Al. Com o aumento do pH, os complexos iônicos sulfatados são progressivamente substituídos por formas de hidróxidos  $[\text{Fe}(\text{OH}), \text{Al}(\text{OH}), \text{Al}(\text{OH})]$ , que se tornam dominantes em condições quase neutras.

A variabilidade nos teores de Fe entre os depósitos pode ser atribuída ao comportamento geoquímico do mesmo em diferentes faixas de pH. Segundo Campaner e Silva (2009), em ambiente de drenagem ácida (baixo pH) a forma iônica  $\text{Fe}^{+2}$  predomina sobre a  $\text{Fe}^{3+}$ , isso ocorre pois o ferro é precipitado como hidróxido em pH 3,5, tendo sua solubilidade diminuída, o que não ocorre com o íon  $\text{Fe}^{2+}$  que precipita como hidróxido em valores de  $\text{pH} < 7,5$ , sendo essa reação lenta e incompleta. Ademais, em ambiente onde o pH é menor do que 3 a oxidação realizada pelo oxigênio pode ser reduzida, sendo que os íons  $\text{Fe}^{3+}$  podem passar a agir como oxidantes primários da pirita

causando a reoxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  e promovendo a perpetuação do ciclo de oxidação da pirita (CASTRO, 2009).

Para o Al a variabilidade também é consequência de seu comportamento geoquímico. Em ambiente de drenagem ácida (pH baixo), se torna solúvel tendo sua solubilidade diminuída quando o pH esta próximo a neutralidade. Isso é atribuído à dissolução elevada de hidróxido amorfo e fases de hidróxido-silicatos, tais como a gibbsita (RIGOL et al., 2009) que disponibilizam Al para o meio.

Os baixos teores de Na detectados são consequentes da lixiviação decorrente do processo de DAM, corroborando com Silva et al. (2014) que encontrou o elemento como um dos principais cátions nos lixiviados do rejeito do carvão alcançando concentrações de até 200 mg/kg.

Os valores de soma de bases (SB) são considerados baixos devido ao decréscimo de cátions básicos. Isso reflete as consequências da formação de compostos ácidos que favorecem o intemperismo dos minerais, lixiviação de cátions (Ca, Mg) acompanhados do ânion sulfato (CAMPOS et al., 2003) influenciando a neogênese de fases minerais contendo K e Na (KÄMPF et al., 1997).

O conteúdo de M.O. é alto quando comparado com as áreas de testemunha, isso pode ser explicado pelo tipo e origem do carvão de Santa Catarina e pelo método de determinação utilizado. O carvão catarinense é do tipo hulha sub-betuminoso originado de material vegetal, caracterizando-se por conter elevadas quantidades de carbono orgânico (80,0 a 85,0%) na sua composição decorrente do processo de carbonificação. Ainda, segundo Roberts et al. (1988), estimar a M.O. em áreas mineradas é difícil devido à contribuição de carbono provenientes dos fragmentos de carvão e dos processos de oxirredução do Fe e Mn. Os baixos teores de argila podem ser um indicativo de que o resíduo dos depósitos é uma mistura de materiais (rejeito e estéreis) resultantes das operações de beneficiamento.

O depósito A23 possui propriedades químicas diferenciadas, pois visualmente já havia passado por processo de recuperação, mas sendo considerado para o estudo por ainda conter rejeito misturado ao solo. Segundo informações do DNPM, alguns depósitos em Siderópolis já haviam passado por processos de recuperação no ano de 2005 obedecendo ao Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) estabelecido. As propriedades químicas relacionados com o complexo de troca, Ca, Mg, Na, K e soma de bases (SB) possuem valores superiores aos constados nos demais depósitos e semelhantes as áreas sem contaminação. Esses resultados concordam com os obtidos por Inda et al. (2010) em solos construídos em SC, indicando processo mais ativo de dissolução protônica de minerais tamponantes possivelmente presentes no solo utilizado na recuperação (PINTO e KÄMPF, 1997; KÄMPF et al., 2000; QUIÑONES et al., 2008). O pH e o teor de fósforo mais altos indicam a correção do solo construído através de calagem e adubação.

As áreas sem contaminação (testemunhas) apresentam propriedades químicas semelhantes, tendo baixos teores de cátions básicos (Ca, Mg, K e P), baixos valores de pH e altos valores de Al trocável (ver Tabela 2), demonstrando que os solos da região são pobres quimicamente, com caráter alítico, ou seja, com baixa saturação por bases e alta por Al, argila de atividade alta, teores de Al trocável superior a  $4 \text{ cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$  (CAMPOS et al., 2003).

### **6.3.2 Teores de elementos-traço no rejeito e estéril**

Os teores totais dos elementos-traço Pb, Ni e Zn quantificados no rejeito demonstraram diferença significativa pelo Teste Scott-Knott a 5% de significância, sendo que para o Cd, na maioria dos depósitos os teores totais ficaram abaixo do

limite de detecção não apresentando diferença significativa (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Teores de elementos-traço no rejeito e estéreis da mineração de carvão e no solo das áreas sem contaminação, da Bacia Carbonífera Catarinense. (Continua).

| <b>Depósitos/<br/>Testemunhas</b> | <b>Cd</b> | <b>Pb</b> | <b>Ni</b> | <b>Zn</b> |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>mg Kg<sup>-1</sup></b>         |           |           |           |           |
| A1                                | 0,6 a     | 59,3c     | 1,6e      | 34,7 c    |
| A2                                | 0,6 a     | 81,2c     | 4,8d      | 41,1 c    |
| A3                                | 0,6 a     | 50,2c     | 4,3d      | 56,9 c    |
| A4                                | 0,6 a     | 43,2c     | 3,0d      | 42,0c     |
| A5                                | 0,6 a     | 58,4c     | 2,6e      | 56,7 c    |
| A6                                | 0,1 a     | 51,6c     | 7,5c      | 49,1 c    |
| A7                                | 0,8 a     | 349,1 a   | 2,3e      | 54,5 c    |
| A8                                | 0,2 a     | 50,7c     | 3,7d      | 50,0c     |
| A9                                | 0,1 a     | 162,4 b   | 2,4e      | 42,6 c    |
| A10                               | 0,3 a     | 43,9c     | 12,8 b    | 42,2 c    |
| A11                               | 0,3 a     | 61,8c     | 21,3 a    | 71,0b     |
| A12                               | 0,6 a     | 31,0c     | 5,1c      | 35,7 c    |
| A13                               | 0,1 a     | 34,6c     | 8,4c      | 46,9 c    |

| <b>Depósitos/<br/>Testemunhas</b> | <b>Cd</b> | <b>Pb</b> | <b>Ni</b> | <b>Zn</b> |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>mg Kg<sup>-1</sup></b>         |           |           |           |           |
| A14                               | 0,1 a     | 45,4c     | 7,2c      | 34,3 c    |
| A15                               | 0,6 a     | 64,4c     | 4,9c      | 35,7 c    |
| A16                               | 0,6 a     | 58,2c     | 2,1e      | 84,2 b    |
| A17                               | 0,6 a     | 29,8c     | 9,6b      | 43,1 c    |
| A18                               | 0,6 a     | 73,9c     | 7,2c      | 178 a     |
| A19                               | 0,1 a     | 47,0c     | 6,2c      | 83,2 b    |
| A20                               | 0,6 a     | 40,7c     | 9,9b      | 57,0c     |
| A21                               | 0,6 a     | 38,6c     | 10,7 b    | 35,7 c    |
| A22                               | 0,1 a     | 62,9c     | 3,4d      | 60,4 c    |
| A23                               | 0,1 a     | 34,6c     | 9,8b      | 88,7 b    |
| AT1                               | 0,1 a     | 64,2c     | 5,4c      | 77,7 b    |
| AT2                               | 0,2 a     | 48,2c     | 2,5e      | 68,5 b    |
| AT3                               | 0,4 a     | 51,2c     | 1,6e      | 80,2 b    |
| AT4                               | 0,1 a     | 68,9c     | 5,9c      | 50,4 c    |

Médias seguidas de letras comparam as áreas, teste de Scott Knott, nível mínimo de significância de 5 %.

Fonte: Próprio autor. (Conclusão).

A concentração de Ni revelou a maior variação, separando os teores em cinco classes distintas, sendo o depósito A11 o que apresentou o maior teor (média 21,3 mg kg<sup>-1</sup>), seguidos do A10, A21, A20, A23 e A17 com valores entre 12,8 e 9,6 mg kg<sup>-1</sup>. Os demais obtiveram teores entre 2,6 e 1,6 mg kg<sup>-1</sup>. Os valores de Pb permitiram a separação em três classes distintas, sendo o depósito A7 o que teve o maior teor (349,1 mg.kg<sup>-1</sup>), seguido do A9 (162,4 mg kg<sup>-1</sup> em média). A terceira classe compreendeu os demais depósitos tendo seus teores variando de 81,2 a 29,8 mg kg<sup>-1</sup>. Para o Zn os depósitos formaram três classes distintas; A18 foi o que apresentou os maiores teores (média 178 mg kg<sup>-1</sup>), seguidos pelo A23, A16, A19 e A11 apresentando teores entre 88,7 e 68,5 mg kg<sup>-1</sup>. Os demais formaram um único grupo onde os teores, variaram de 60,4 a 34,3 mg kg<sup>-1</sup>(ver Tabela 3).

Os teores de Cd, Ni e Zn ficaram abaixo dos valores de prevenção estabelecido pela resolução do CONAMA 420/2006 (1,3 mg kg<sup>-1</sup>, 30 mg kg<sup>-1</sup>e 300 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente), para solos, já os teores de Pb demonstraram valores acima do estabelecido (72 mg kg<sup>-1</sup>), em quatro depósitos avaliados (A7, A9, A2 e A18).

A presença destes elementos pode estar associada a sulfetos metálicos que tem alta afinidade por elementos-traço, bem como a pirita, podendo absorvê-los em sua superfície naturalmente (AL et al., 1997; FARFAN et al., 2004). Contudo, são perdidos através da lixiviação ou percolação pela pilha de rejeito-piritoso devido ao processo de DAM. Isto é consistente com o demonstrado por Cutruneo et al. (2014), que relata a influência direta da pirita nas concentrações de todos os elementos tóxicos do rejeito incluindo o enxofre, reportando-se a ela como um componente onipresente com relevância ambiental, considerando-a como um reservatório de elementos-traço.



Além disso, a concentração de elementos-traço no rejeito está condicionada entre outros fatores a composição mineralógica do carvão que traz consigo diferentes íons metálicos. O carvão brasileiro é caracterizado pela alta gama de minerais sulfetos como a pirita, a marcassita (MARCELLO et al., 2008; LATTUADA et al., 2009; GALATTO et al., 2009; SILVA et al., 2009) e ainda minerais secundários, formados a partir do processo de DAM, como a jarosita e a schwertmannita que podem assimilar dentro de suas estruturas elementos como Pb, As e Cr (SIMONA et al., 2004; STOFFREGEN et al., 2000). Além disso, a oxidação de outros sulfetos de ferro, como pirrotita (FeS), arsenopirita (AsFeS) e calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), também podem gerar soluções ácidas e disponibilizar elementos tóxicos. Contudo, nem todos os minerais sulfetados presentes no carvão mineral sofrem hidrólise ácida, a galena (PbS), a esfalerita (ZnS) e a calcocita (CuS), por exemplo podem liberar metais presentes em suas estruturas sem causar acidez (MELLO et al., 2003) o que depende do equilíbrio químico do meio. Assim sendo, a ocorrência Cd, Ni, Zn e Pb, dentre outros elementos-traço, no rejeito do carvão, mesmo em quantidades consideradas baixas, é um indicativo da dissolução de minerais potencialmente contaminantes.

Outro fator que pode estar associado à baixa concentração dos elementos-traço no rejeito é a geoquímica dos mesmos em condições ácidas bem como o tempo de formação e exposição dos depósitos (ver Quadro 2). Com pH baixo Cd, Ni e Zn formam ligações eletrostáticas com minerais de argila e matéria orgânica, tendo suas formas trocáveis e solúveis favorecidas o que pode ocasionar perdas por lixiviação; em contrapartida em pH próximo a neutralidade ou alcalino formam complexos estáveis com a matéria orgânica, co-precipitados com óxidos de Fe, Mn e CaCO<sub>3</sub> além de se adsorver com aluminossilicatos e minerais de argila tornando-se insolúveis (McBRIDE, 1994).

Silva et al. (2011 b), avaliando o lixiviado do resíduo de carvão de SC encontrou Mn, Zn, Cu, Co e Ni como os principais elementos lixiviados em condições de pH baixo, sendo extraídos em altas quantidades. Também Cutruneo et al. (2014), estudando a oxidação de sulfetos no rejeito do carvão de Santa Catarina, mostraram que o Ni é um dos elementos mais móveis e biodisponíveis nos carvões brasileiros (OLIVEIRA et al., 2012) podendo estar associado com os sulfetos e também com a matéria orgânica; Cd e Zn foram encontrados em teores mais elevados do que a média dos carvões do mundo, ocorrendo principalmente na pirita e alternativamente em alguns minerais de argila. O trabalho também avaliou o conteúdo dos elementos traços no lixiviado dos rejeitos encontrando altas concentrações de Zn, Cu, Mn, Co, Ni e Cd, associadas às condições ácidas e a oxidação da pirita. Ainda relatam que a mobilidade relativa (% do total de metal libertado) de Cu, Co, Cd e Zn é alta, tendo praticamente todo o conteúdo total perdido em um curto espaço de tempo. O Pb por sua vez apresenta uma mobilidade praticamente nula devido à possível formação de sulfato de chumbo insolúvel.

Corroborando com o estudo citado, os teores de Pb, no presente trabalho, apresentaram variabilidade entre os depósitos, sendo que em quatro deles (A2, A7, A9 e A18) estavam acima do valor de prevenção ( $72 \text{ mg kg}^{-1}$ ) permitido pela resolução do CONAMA 420/2006, tendo nos demais em sua maioria teores próximos a esse valor. Os altos teores podem estar associados com a sua geoquímica sendo considerado como um dos elementos-traço menos móveis, podendo ser complexado pela matéria orgânica, quimiossorvido em óxidos e minerais silicatados e precipitado como carbonato, hidróxidos ou fosfato (McBRIDE, 1994), sendo um dos metais tóxicos mais abundantes em carvão (FINKELMAN, 1994; BORGES et al., 2006; SILVA et al., 2011). Seu campo de estabilidade no sistema de Pb-S-C-O-H é

pequeno, principalmente em valores de pH baixos ( $\text{pH} < 5$ ) combinado com condições de oxidação e concentrações elevadas de sulfatos em solução (BROOKINS, 1988).

Ainda, avaliações realizadas por inúmeros autores (FINKELMAN, 1994; GOODARZI, 2002; KETRISYUDOVICH, 2009; OLIVEIRA et al., 2012; CUTRUNEO et al., 2014), revelam que o rejeito de carvões do sul do Brasil, apresentam Pb associado com a matéria mineral, principalmente sulfetos e carbonatos (pirite, calcite e dolomite) incluindo as fases, como galena ( $\text{PbS}$ ), clausthalite ( $\text{PbSe}$ ), siderite e minerais secundários (hematita, melanterite e jarosite), podendo ser o caso do rejeito avaliado nos depósitos estudados. A possível presença de minerais como o sulfato de chumbo que são muito insolúveis podem ter precipitado o Pb, sendo solubilizado durante a oxidação da pirita (YU et al., 1999; GAGLIANO et al., 2004).

A associação desse elemento (Pb) com a pirita é relatada por muitos autores. Muniz (2009) estudando a composição química da pirita encontrou cerca de  $1000 \text{ mg.kg}^{-1}$  de Pb; Silva et al. (2011 b) descobriram teores que atingiram até  $100 \text{ mg.kg}^{-1}$  do elemento no rejeito; Cutruneo et al. (2014) relataram concentrações até 10 vezes maiores do que os valores médios mundiais também no rejeito do beneficiamento; Simão (2012), também encontrou concentrações altas do elemento no rejeito dos carvões da camada Rio Bonito. Ambos evidenciaram ainda a baixa mobilidade do elemento devido à concentração reduzida nos lixiviados equivalentes, independentemente do pH da solução.

Vale ressaltar que o depósito A7, que possui o maior teor de Pb, ainda recebe resíduos de cavas ativas e inativas localizadas próximas a ele demonstrando que mesmo tendo sido formado a cerca de 42 anos o processo de drenagem ácida e suas consequentes alterações na química do ambiente continuam ativos (DE LUCA, 1991; KONTOPOULOS, 1998)

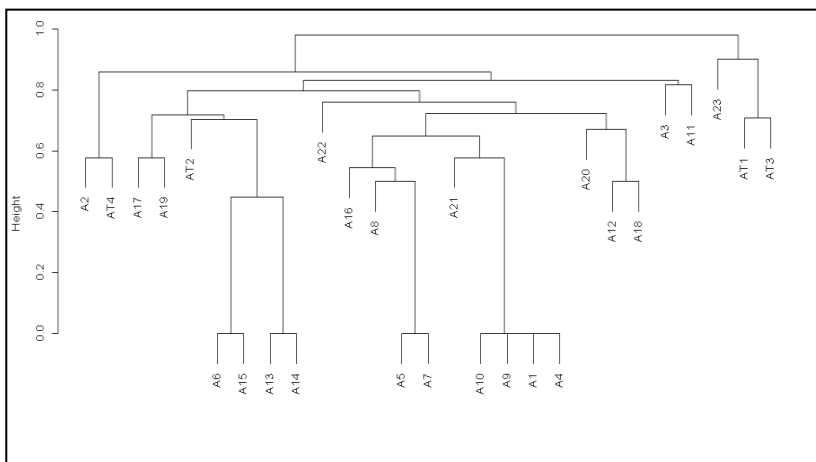
causando graves danos ambientais, inativando o uso solo e da água dos depósitos assim como de todo seu entorno.

### **6.3.3 Relação entre depósitos e a presença/ausência de espécies de samambaias e licófitas**

O objetivo inicial deste estudo, buscava encontrar uma relação entre a presença/ausência das espécies de samambaias e licófitas com o teor dos elementos-traço Cd, Pb, Ni e Zn, no rejeito e estéreis dos depósitos, sendo que para isso, foram realizados dois testes estatísticos multivariados a análise de agrupamento ou análise de “*Cluster*” e o método de ordenação ou análise NMDS (Nonmetric Multidimensional Scaling), frequentemente utilizados para sintetizar conjuntos de dados, permitindo interpretações sobre padrões no espaço e no tempo. Contudo, nenhum dos testes demonstrou significância entre os dados avaliados, concluindo-se que em primeira análise não há relação direta entre a ocorrência das espécies de samambaias e licófitas e os teores de elementos-traço no rejeito e estéreis da mineração de carvão.

Em virtude dessa constatação optou-se por verificar a relação entre os 23 depósitos estudados e as 04 áreas sem contaminação com a presença/ausência das espécies de samambaias e licófitas, procedendo-se com a análise de agrupamento, demonstrados no dendrograma de “*Cluster*” (ver Figura 17).

Figura 17 - Dendrograma de ordenação dos 23 depósitos de rejeito e estéril da mineração de carvão e das 04 áreas sem contaminação (testemunhas), da Bacia Carbonífera de Santa Catarina.



\*O local de ocorrência de cada espécie de samambaia e licófitas bem como a classificação completa é tema do capítulo I do presente estudo.

Fonte: Próprio autor.

O depósito A23 e as áreas de testemunhas AT1 e AT3, formaram um agrupamento isolado, com dissimilaridade acima de 90%, sendo semelhantes entre si, mas distintos dos demais (ver Figura 17). Isso ocorreu, pois as espécies *Blechnum brasiliense*, *Elaphoglossum* sp. E *Rumohra adiantiformis* que separaram esses locais dos demais, ocorrem apenas nestas áreas. O grupo apresenta atributos químicos semelhantes e a ausência de contaminação das áreas de testemunha.

As espécies de samambaias e licófitas encontradas no depósito A23 podem ter sua sobrevivência relacionada à presença de uma camada de solo que mesmo misturada a fragmentos de rocha e rejeito provenientes da mineração, possui características químicas (ver Tabela 2) que favorecem o

desenvolvimento vegetal, não tendo contaminação por elementos-traço (ver Tabela 3). Ainda, o depósito continha uma série de plantas de outras espécies, não apresentando as samambaias comuns em depósitos onde a degradação é mais intensa, como a *Pteridium arachnoideum* e *Pityrogramma calomelanos*. As espécies mencionadas possuem plasticidade fenotípica, podendo ajustar sua morfologia e/ou fisiologia em decorrência de sua interação com o ambiente (BOEGER, 2007).

Após a separação deste grupo, houve a formação de dois outros grupos, com dissimilaridade em torno de 90%. O primeiro compreendeu o depósito A2 e a área de testemunha AT4 e nestes locais as espécies *P. calomelanos* e *Gleichenella pectinata* predominaram. O depósito A2 tem seu substrato formado em maior parte por pilhas de estéril misturado ao solo com pouca incidência de rejeito-piritoso, sendo pobre quimicamente, mas não demonstrando contaminação por elementos-traço (ver Tabelas 2 e 3). A área de testemunha AT4, apesar de não conter rejeito-piritoso e nem estéreis justifica sua similaridade com o depósito por conter as mesmas espécies de samambaias e fertilidade precária. Esta área fica adjacente a uma estrada onde se faz comum o desenvolvimento das espécies supracitadas, como colonizadoras e adaptadas a solos de extrema pobreza (CUSATIS, 2001).

O segundo agrupamento incluiu os demais depósitos do estudo, sendo que para uma melhor apresentação dos dados optou-se por realizar uma nova separação com dissimilaridade acima de 80%, obtendo-se assim três formações. A primeira englobou os depósitos A17, A19, A6, A15, A13, A14 e a área de testemunha AT2, onde há o predomínio de *P. arachnoideum*, *P. calomelanos*, *G. pectinata* e *Lygodium venustum*. A segunda formação abrangeu os depósitos A22, A16, A8, A5, A7, A21, A10, A9, A1, A4, A20, A12 e A18, sendo dominantes a *P. arachnoideum* e a *P. calomelanos* e na

terceira formação tem-se os depósitos A3 e A11 contemplando apenas *P. arachnoideum*.

A área de testemunha AT2 localiza-se na beira de uma estrada, mas mesmo não apresentando contaminação por elementos-traço (ver Tabela 3), é pobre quimicamente (ver Tabela 2) e abriga espécies que se adaptam bem as condições precárias do ambiente, sendo semelhante aos depósitos.

Nos depósitos é possível notar que o substrato é formado pela mistura de estéreis, solo e em maior quantidade de rejeito-piritoso, por isso há uma diminuição na abundância das samambaias e licófitas restando apenas àquelas mais resistentes às condições inóspitas do meio. São locais com baixos teores de nutrientes, presença de elementos tóxicos (ver Tabela 2) e apresentam indícios de contaminação por elementos traços (ver Tabela 3). As espécies predominantes nestes locais são comuns onde já houve sucessivas degradações com perdas de nutrientes do solo, sendo as espécies de Gleicheniaceae as primeiras a colonizarem e se adaptarem a solos de extrema pobreza (CUSATIS, 2001).

Apesar da semelhança química os depósitos apresentam diferentes idades de formação e uma possível relação com a presença de determinadas espécies, sendo que em geral, os depósitos mais jovens com idade de formação de 32 anos apresentam maior número de espécies de samambaias e licófitas. Já os depósitos mais antigos, com idade de formação entre 40 e 52 anos abrigam menor número, sendo a *P. arachnoideum* e a *P. calomelanos* predominantes em três dos cinco grupos formados pelo agrupamento, podendo ser consideradas como pioneiras na colonização dos depósitos.

A ocorrência samambaias e licófitas nos depósitos pode estar condicionada a três fatores: I) existência das mesmas em remanescentes florestais no entorno dos depósitos; II) forma de dispersão anemocórica da maioria das pteridófitas, sendo que os esporos, pequenos e em grande quantidade, podem ser transportados facilmente a distâncias de até 800 quilômetros,

facilitando a exploração de superfícies expostas e desnudas (TRYON, 1970) e III) lenta instalação inicial (desenvolvimento do gametófito), longo desenvolvimento do esporófito e à multiplicação vegetativa para a exploração espacial do local (WHITTIER, 1970; QUEIROZ, 1994). Estas condições encontram-se reunidas em plantas que habitam locais constantemente desmatados ou queimados ou em condições de degradação e compactação intensas (QUEIROZ, 1994).

Vale ressaltar que *P. arachnoideum* teve a maior ocorrência nos depósitos e de acordo com Schwartzburd (2014), é típica de ambientes degradados fazendo parte da regeneração natural desses ecossistemas. Sua eficiência e agressividade em se instalar em ambientes degradados são relatados por muitos autores (SILVA MATOS; PIVELLO, 2009; ROOS et al., 2010; SILVA et al., 2010; RIBEIRO et al., 2013) que mencionam ainda o fato de que locais completamente habitados por *P. arachnoideum* proporcionam a perda de diversidade de espécies por inibição da germinação de sementes, devido a produção de substâncias alelopáticas que impem o desenvolvimento de propágulos de outras espécies.

Essa rusticidade é confirmada pela sua preferencia por ambientes com pH baixo, desprovidos de nutrientes, pouca umidade e predomínio de luminosidade onde ocorrem em grandes touceiras e/ou grupamentos (SALGADO, 2012).

Nos depósitos onde há concentração mais elevadas de elementos-traço, principalmente Pb, as espécies predominantes *P. arachnoideum* e *P. calomelanos*, toleram esses teores habitando e sobrevivendo bem nestes locais. Alguns autores trabalhando com samambaias e licófitas (MA et al., 2001; ZHAO et al., 2002; FAYIGA, 2007; KOLLER et al., 2008; ROCCOTIELLO et al., 2010; KUMARI et al., 2011) entre outros) tem relatado a capacidade deste grupo de espécies em tolerar e até mesmo acumular elementos-traço. Ademais, podem formar associações com microorganismos que tem a



capacidade de melhorar o ambiente rizosférico das plantas auxiliando na sua sobrevivência (KHAN, 2005).

Contudo, uma investigação detalhada sobre os mecanismos de sobrevivência utilizados pelas samambaias e licófitas, relatadas neste estudo, para habitarem locais com concentrações de elementos-traço se faz necessário, visando a avaliação da viabilidade de integração desse grupo em projetos de recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão, substituindo espécies exóticas, frequentemente utilizadas, constituindo uma alternativa de baixo custo e alto valor ecológico.

## 6.4 CONCLUSÃO

O rejeito e o estéril da mineração de carvão são pobres quimicamente, apresentando baixos índices de pH e cátions básicos e altos teores de elementos considerados tóxicos ao desenvolvimento vegetal, resultado do processo de DAM, ainda incipiente.

Os teores totais dos elementos-traço Cd, Ni e Zn no rejeito da mineração de carvão estão abaixo dos valores de prevenção estabelecidos pela resolução do CONAMA 420/2006 e os teores totais do elemento-traço Pb esta acima do valo de prevenção estabelecido pela resolução do CONAMA 420/2006, em quatro depósitos avaliados (A7, A9, A2 e A18).

Não houve relação entre presença/ausência das espécies e os teores de elementos-traço, provavelmente pela baixa concentração e dinâmica desses elementos em ambientes de DAM.

Houve relação entre a presença/ausência de espécies de samambaias e licófitas com os depósitos estudados (local de coleta).

Os depósitos mais jovens (idade de formação de 32 anos) apresentaram maior número de espécies de samambaias e

licófitas e os depósitos mais antigos (idade de formação entre 40 e 52 anos) abrigaram menor número de espécies, sendo que a *P. arachnoideum* e a *P. calomelanos* foram predominantes nos agrupamentos.

As samambaias e licófitas observadas nos depósitos de rejeito e estéreis da mineração de carvão são pioneiras podendo ser consideradas como colonizadoras desses ambientes.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações geradas neste estudo possibilitam o conhecimento dos atributos químicos dos rejeitos e estéreis, resultado da exploração e do beneficiamento do carvão mineral, bem como de plantas capazes de habitar esses substratos.

A mineração de carvão, iniciada a mais de trinta anos, trouxe consigo desenvolvimento econômico e social para a região de exploração, mas também gerou graves consequências ao meio ambiente, possíveis de serem notados até os dias atuais.

A falta de experiência e informação a respeito dos prejuízos que a atividade, sem controle, poderia causar originou a formação de imensos depósitos de rejeito e estéreis que descaracterizaram grande parte da paisagem da zona rural da Bacia Carbonífera Catarinense, extinguindo a fauna, a flora e inviabilizando o uso do solo e dos recursos hídricos.

Essa degradação foi causada principalmente, pelo fenômeno conhecido como drenagem ácida de mina (DAM), formado a partir da exposição dos rejeitos e estéreis do carvão que contêm grandes quantidades de pirita, um mineral composto de enxofre e ferro, que quando exposto ao ar e a água atmosféricos originam uma solução ácida e rica em elementos-traço, capaz de alterar o equilíbrio químico do solo e da água.

Mesmo após anos de exploração a DAM ainda é considerada o principal prejuízo da atividade carbonífera, pois seu alto potencial poluidor atinge áreas distantes do local onde se originou, por meio da percolação pelo perfil do solo e da chegada até os mananciais, promovendo um rastro de devastação.

Agravando ainda mais a situação, a região da Bacia Carbonífera Catarinense apresenta clima quente, com temperaturas que ultrapassam os 30°C, nas épocas mais quentes do ano. Esse fato, aliado com volumes de precipitações que chegam a 2200 mm aceleram o processo de DAM, degradando mais rapidamente o ambiente.

Os dados mostrados no presente estudo evidenciam esta degradação. Nos antigos depósitos de rejeito e estéreis o processo de DAM ainda encontra-se ativo, o que pode ser comprovado pelos baixos índices de pH, pobreza química do material e a presença de elementos-traço nocivos ao meio ambiente e a saúde humana.

Apesar da má qualidade do substrato e da degradação extrema, foi possível encontrar espécies, pertencentes ao grupo das samambaias e licófitas, capazes de se desenvolver nestes ambientes e contribuir para ações de recuperação das áreas degradadas pela mineração. Essas espécies, classificadas como pioneiras e nativas da região, se adaptam bem a ambientes com pouca fertilidade e incidência solar direta, situação comum nos depósitos estudados.

*Pteridium arachnoideum* e *Pityrogramma calomelanos* foram as espécies que mais se destacaram, sendo encontradas em 21 dos 23 depósitos estudados, variando apenas o tipo de substrato em que se desenvolviam (rejeito ou estéril) e a idade de formação dos depósitos, indicando sua plasticidade e rusticidade em condições inóspitas. Apesar das espécies supracitadas aparecerem com mais frequência foram registradas outras 15 espécies que compartilham das mesmas características fenotípicas.

Esse comportamento reforça a indicação de que esse grupo de espécies possui potencial para uso em áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto podendo promover a regeneração natural destes locais.

Entretanto, mesmo com a gama de informações contidas neste estudo e as potencialidades desse grupo de espécies, se faz necessário uma investigação detalhada a respeito dos mecanismos de sobrevivência utilizados pelas mesmas visando a avaliação da viabilidade de formas de integração desse grupo em projetos de recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão, substituindo espécies exóticas, frequentemente utilizadas, constituindo uma alternativa de baixo custo e alto valor ecológico.

Atualmente, já são conhecidas inúmeras técnicas para obtenção do carvão mineral de maneira “limpa”, de tratamentos e usos dos resíduos gerados, e de planos e projetos de recuperação das áreas degradadas trazendo conhecimento para a minimização dos danos ambientais gerados pela exploração e beneficiamento do carvão.

Contudo, ainda há um longo caminho pela frente, pois a atividade carbonífera, antes realizada sem conhecimento prévio de seus prejuízos, causou graves passivos ambientais, difíceis de serem revertidos o que evidencia o papel fundamental da pesquisa na busca pela melhoria contínua dos processos em toda cadeia produtiva do carvão, trazendo qualidade de vida para os moradores e trabalhadores da região, impulsionando a economia local e nacional e dessa forma conscientizando e preservando o meio ambiente para esta e para as futuras gerações.

A realização desse trabalho e as informações contidas nele poderão contribuir singularmente para a complementação de planos e projetos de recuperação e monitoramento ambiental, favorecendo a recuperação de áreas degradadas pela mineração no sul de Santa Catarina, incentivando a preservação e conservação ambiental.

## REFERÊNCIAS

- AL, T.A., BLOWES, D.W., MARTIN, C.J., CABRI, L.J., JAMBOR, J.L. Aqueous geochemistry and analysis of pyrite surfaces in sulfide-rich mine tailings. **Geochim. Cosmochim. Acta** 61, 2353–2366. 1997.
- BACK, A.J. Caracterização climática. In: BACK, A.J. **Mineração de carvão, meio ambiente e desenvolvimento sustentável no sul de Santa Catarina: uma abordagem interdisciplinar**. Ed. Afiliada, 2009.
- BARNHISEL, R. I.; POWELL, J.L.; AKIN, G.W. & EBELHAR, M.W. **Characteristics and reclamation of acid sulfate mine spoil**. In : KITTRICK, J. A.; FANNING, D. S. & HOSSNER, L. R., eds. Acid sulfate weathering. **Madison, Soil Science Society America**, p.37-56, 1982.
- BOEGER, M.R.T.; CAVICHIOLO, L.C. PIL, M.W.; LABIAK, P.H. **Variabilidade fenotípica de *Rumohra adiantiformis* (G. Forst) Ching (Dryopteridaceae)**. *Hoehnea* 34(4): 553-561; 2007.
- BORGES, D., GALLINDO, L., FURTADO, A. S., CURTIUS, A. J., WELZ, B., & HEITMANN, U. **Determination of lead in coal using direct solid sampling and high resolution**

**continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry.** Microchim Acta, 154, 101– 107, 2006.

BRAGA, H.J.; GHELLERE, R. Proposta da diferenciação climática para o Estado de Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 11; Reunião Latino Americana de Agrometeorologia, 2. 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia-SBA, 1999. 1CD-ROM.

BRAGA, M.F; BOIT, K. da; RAMOS, C.G; DALMORA, A; HIDALGO, G.E.N. **Implicações dos resíduos de carvão e minerais ferrosos em fechamento de mina em Santa Catarina, Brasil.** IX Simpósio Internacional de qualidade ambiental. Porto alegre, 2014. Disponível em: <<http://www.obes-rs.org.br/qualidade2014>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2015.

BROOKINS, D.G. **Eh–pH diagrams for geochemistry.** New York: Springer-Verlag, 1988.

CAMPANER, V. P. & SILVA, W. L. Processos físico-químicos em drenagem ácida de minas em mineração de carvão no sul do Brasil. **Química Nova**, v. 32, p. 146-152, 2009.

CAMPOS, M.L. et al. Avaliação de três áreas de solo construídos após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 1123-1137, 2003.

CAMPOS., M. L. C.; ALMEIDA, J. .A.; SILVEIRA, C. B. DA.; GATIBONI1, L. C.; JACKSON ADRIANO ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; MIQUELLUTI1, D.J.; KLAUBERG FILHO,O.; SANTOS, J. C.P. Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v.9, n.2, p. 198-205, 2010. ISSN 1676-9732.

CASTRO, S.C.; GUERREIRO, M.C.; OLIVEIRA, L.C.A.; GONÇALVES, M. remoção de compostos orgânicos em água empregando carvão ativado impregnado com óxido de ferro: ação combinada de adsorção e oxidação em presença de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. **Quim. Nova**, Vol. 32, No. 6, S1-S2, 2009.

COLLARES, J. E. R. Mapa de Biomas do Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 57. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Botânica do Brasil, p. 306-309, 2006.

COLONETTI. S. **Floresta ombrófila Densa Submontana: Florística, Estrutura e efeitos do solo e da topografia, Barragem do Rio São Bento, Siderópolis, SC.** Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, SC, 84 p, 2008.

CUSATIS, A. C. **Diagnósticos de Taludes Rodoviários Revegetados Naturalmente na Região de Viçosa, MG.** Dissertação de Magister Scientiae. UFV. Viçosa, MG. 2001.



CUTRUNEO, C.M.N.L; OLIVEIRA, M. L.S;WARD, C.R;HOWER, J.C; BRUM, I.A.S.de. SAMPAIO, C.H; KAUTZMANN, R.M; TAFFAREL, S.R; TEIXEIRA, E.C;SILVA, L.F.O.A mineralogical and geochemical study of three Brazilian coal cleaningrejects: Demonstration of electron beam applications International. **Journal of Coal Geology** 130 p. 33–52, 2014.

DANIELS, W.L. **Manipulating the chemical properties of soil and mining wastes**. In: ALVAREZ V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., (EDS). O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal de Viçosa, p. 869 – 897, 1996.

DE LUCA, S. **Medidas corretivas e preventivas de impactos da mineração de carvão**. In: Carvão Mineral II. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 1991.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Ciências do Solo. **Manual de métodos e análises de solo**. Rio de Janeiro, 212 p, 1997.

EPAGRI. EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E DE EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. **Zoneamento agroecológico e socioeconômico do estado de Santa Catarina**. Florianópolis: EPAGRI, 1999. 1 CD ROM.

FAYIGA, A.O.; MA, L.Q.; ZHOU, Q. Effects of plant arsenic uptake and heavy metals on arsenic distribution in an arsenic-contaminated soil. **Environmental Pollution** 147, p.737-742. 2007.

FARFAN, J. R. J. Z. BARBOSA FILHO, O., SOUZA, V. P. **Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral**. Série Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, v. 29, 58p, 2004.

FILGUEIRAS, T. S. et al. **Caminhamento: um método expedito para levantamentos florísticos qualitativos**. Rio de Janeiro, Cadernos de Geociências., n. 12, p. 39-43, 1994.

FINKELMAN, R.B. **Modes of occurrence of potentially hazardous elements in coal: levels of confidence**. Fuel Process. Technol. 39, 21–34. 1994.

GALATTO, S. L., PETERSON, M., ALEXANDRE, N. Z., DA COSTA, J. A. D., IZIDORO, G., SORATO, L., et al. **Incorporação de resíduo do tratamento de drenagem ácida em massa de cerâmica vermelha**. Cerâmica, 55, p.53–60, 2009.

GAGLIANO, W. B., BRILL, M. R., & BIGHAM, J. M. **Chemistry and mineralogy of ochreous sediments in a constructed mine drainage wetland**. GeochimicaEtCosmochimicaActa, 68, p.2119–2128, 2004.

GOODARZI, F. **Mineralogy, elemental composition and modes of occurrence of elements in Canadian feed-coals**, Fuel 81. p.1199–1213, 2002.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manuais Técnicos em Geociências 1: **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE. 275p, 2012.

INDA, A.V.; QUINÕES, O.R.G.; GIASSEN, E.; BISSANI, C.A.; DICK, D.P. & NASCIMENTO, P.C. **Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão**. Ciência Rural, v.40, n.5, mai, 2010.

KÄMPF, N. et al. Propriedades pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na Bacia Carbonífera do Baixo Jacuí. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 165-178, 1997.

KÄMPF, N. et al. **Solos construídos em áreas de mineração da Bacia Carbonífera**. In: Centro de Ecologia – UFRGS. Carvão e meio ambiente. Porto Alegre: UFRGS. Cap.17, p.596-640, 2000.

KETRIS, M.P., YUDOVICH, YA.E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals. **International Journal of Coal Geology** 78, 135–148, 2009.

KHAN, A.G. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology** 18; p.355–364. 2005.

KOLLER, C. E.; PATRICK, J. W.; ROSE, R. J.; OFFLER, C. E.; MACFARLANE, G. R. **Arsenic and heavy metal accumulation by *Pteris vittata* L. and *P.-umbrosa* R. Br.** **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**. Vol. 80, Issue 2, p. 128-133, 2008.

KONTOPOULOS, A. **Acid mine drainage control**. In: Castro, S.H. Effluent treatment in the mining industry. Chile: University of Concepción, p. 57-118. 1998.

KUMARI, A.; LAE, B.; PAKADE, B.; CHARD, P. Assessment of bioaccumulation of heavy metal by *Pteris vittata* L. growing in the vicinity of by ash. **International Journal of Phytoremediation**, 13.779, 2011.

KRAMER, K. U. & GREEN, P. S. **Pteridophytes and Gymnosperms** Vol. I. In: K. KUBITZKI (Ed.). The families and genera of vascular plants. Springer Verlag, Berlin, 404 p. Lellinger, 1990.

LATTUADA, R. M., MENEZES, C. T. B., PAVEI, P. T., PERALBA, M. C. R., & DOS SANTOS, J. H. Z. Determination of metals by total reflection X-ray fluorescence and evaluation of toxicity of a river impacted by coal mining in

the south of Brazil. **Journal of Hazardous Materials**, 163, 531–537, 2009.

MA, L. Q.; KOMAR, K. M.; TU, C.; ZHANG, W.; CAI, Y.; KENNELLEY, E. D.; A fern that hyperaccumulates arsenic. **Nature**. p.409-579, 2001.

MACHADO, L. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Controle da geração de drenagem ácida de minas na mineração de carvão com cinzas de termoeletrica. **Anais: 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente Bento Gonçalves – RS, Brasil**, 2012.

MARCELLO, R.R., GALATOS, S., PETERSON, M., RIELLAC, H.G., BERNARDIN, A.M.. **Inorganic pigments made from the recycling of coal mine drainage treatment sludge**. J. Environ. Manag. 88, 1280–1284. 2008.

MCBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University, 406p, 1994.

MELLO, J.W.V.; DIAS, L.E.; CORREA, M.L.T. Drenagem ácida: avaliação do potencial de ocorrência, mitigação e revegetação de substratos sulfetados. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V.V.H. **Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. v. III. p. 401-430, 2003.

MELLO, J.W.V.; DUARTE, H.A; LADEIRA, A.C.Q. **Origem e controle do fenômeno drenagem ácida de mina.** Cadernos de Química Nova na Escola, n<sup>o</sup>8, p. 24-29, 2014.

MORAN, R.C. **Diversity, biogeography, and floristics.** In: RANKER, T.A. & HAUFLE, C.H. (eds.). *Biology and evolution of ferns and lycophytes.* Cambridge University Press, New York. p. 367-394, 2008.

MUNIZ, D.H.F. de.; OLIVEIRA-FILHO, E.C. **Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente.** Universidade Ciências da Saúde, v. 4, n. 1 / 2, p. 83-100, 2009. ISSN: 1678-5398.

NASCIMENTO, F. M. F.; MENDONÇA, R. M. G.; MACÊDO, M. I. F.; SOARES, P. S. M. **Impactos Ambientais nos Recursos Hídricos da Exploração de Carvão em Santa Catarina.** CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO & II CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, 2. Belo Horizonte, **Anais...**, 2002.

OLIVEIRA, M.L.S., WARD, C.R., FRENCH, D., HOWER, J.C., QUEROL, X., SILVA, L.F.O. **Mineralogy and leaching characteristics of beneficiated coal products from Santa Catarina, Brazil.** *Int. J. Coal Geol.* 94, 314–325. 2012.

PRADO, J.; SYLVESTRE, L.S. **Samambaias e Licófitas.** In: Forzza, R.C. et al. (eds.). *Catálogo de plantas e fungos do*

Brasil. Vol. 1. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Pp. 522-567, 2010.

PINTO, L.F.S. & KAMPF, N. Contaminação dos solos construídos. In: TEIXEIRA, E.C. & PIRES, M.J.R. **Meio ambiente e carvão: Impactos da exploração e utilização**. FEPAM, Porto Alegre, RG, 498 p, 1997.

QUEIROZ, M. H. de. **Approche phytoécologique et dynamique des formations végétales secondaires développées après abandon des activités agricoles, dans le domaine de la Forêt Ombrophile dense de versant (Forêt Atlantique) à Santa Catarina- Brésil**. École Nationale du Génie Rural des Eaux et de Forêts. Thèse de Doctorat. Nancy, França. 1994.

QUINÕES, G.R.O., JUNIOR, I.V.A., GIASSON, E., BISSANI, A.C., DICK, P.D. **Características de Solos Construídos Após Mineração de Carvão Relacionadas ao Processo de Construção e à Composição do Material Utilizado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). **Rev. Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.6, p.1564-1571, set, 2008 ISSN 0103-8478.

R. DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>. 2008.

REDIVO, R.V. **Caracterização tecnológica do carvão das**

**camadas barro branco e bonito para fins enérgicos na região de Criciúma - SC.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 81p., 2002.

RIBEIRO, J.; TAFFAREL, S.R.; SAMPAIO, C.H.; FLORES, D.; SILVA, L.F.O. **Mineral speciation and fate of some hazardous contaminants in coal waste pile from anthracite mining in Portugal.** Int. J. Coal Geol. 109–110, 15–23. 2013.

RIGOL, A., MATEU, J., GONZALEZ-NUNEZ, R., RAURET, G., & VIDAL, M. **pH Stat vs. single extraction tests to evaluate heavy metals and arsenic leachability in environmental samples.** Analytica Chimica Acta, 632, 69–79. 2009.

ROBERTS, J.A. et al. Early stages of mines soil genesis in Southwest Virginia spoil lithosequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p.716-723, 1988.

ROBERTSON, W.D. **Sulfide Oxidation Mechanisms: Controls and Rates of Oxygen Transport, MAC Short Course.** Handbook Vol. 22, pp. 163 -183, J.L. Jambor ; D.W. Blowes (eds.), Waterloo, Ontario, May 1994.

ROCCOTIELLO, E.; MANFREDI, A.; DRAVA, G.; MINGANTI, V.; MARIOTTI, M.G.; BERTA, G. e CORNARA, L. Zinc tolerance and accumulation in the ferns *Polypodium cambricum* L. and *Pteris vittata* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 73. 1264–1271. 2010.



ROSS, J. L. S. **Geomorfologia Ambiental**. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.351-388, 1998.

ROTHFELS, C.J.; SUNDUE, M.A.; KUO, LI-Y.; LARSSON, A.; KATO, M.; SCHUETTPELZ, E. & PRYER, K.M. **A revised family-level classification for eupolypod II ferns (Polypodiidae: Polypodiales)**. *Taxon* 61(3): p. 515–533, 2012.

RUCANDIO, M.I.; PETIT, M.D. Determination of cadmium in coal fly ash, soil and sediment samples by GFAAS with evaluation of different matrix modifiers. **J. Anal. Chem.**, 364:541-548, 1999.

SALGADO RS. **Identificação de unidade de habitat (UH) para *Pteridium aquilinum*, em áreas selecionadas da área de proteção ambiental (APA) Gama e Cabeça de Veado, DF**. Dissertação. Universidade Católica de Brasília, Brasil, 2012.

SÁNCHEZ-ESPANÃ, J., LÓPEZ PAMO, E., SANTOFIMIA, E., REYES, J., MARTÍN RUBÍ, J.A. The impact of acid mine drainage on the water quality of the Odiel river (Huelva, Spain): geochemical and mineralogical constrains along the Concepción-Tintillo segment. **Water Air Soil Pollut.** 173, 121–149.2006.

SAS Institute. **Inc® SAS Ver. 9.1.** 3 SAS Institute Inc.: Cary, NC, USA. Lic. UDESC.2003.

SCHWARTSBURD, P. B. The Identity of Polypodiaceae. **American Fern Journal**, v. 104, p. 16-21, 2014.

SILVA, L.F.O., OLIVEIRA, M.L.S., DA BOIT, K.M., FINKELMAN, R.B. Characterization of Santa Catarina (Brazil) coal with respect to Human Health and Environmental Concerns. **Environ. Geochem. Health** 31, p.475–485, 2009.

SILVA, L. F. O.; OLIVERIA, M. L. S.A. Preliminar study of coal mining drainage and environmental health in the Santa Catarina region, Brazil. **Environmental Geochemistry and Health**.DOI:10.1007/s10653-010-9322-x, 2010.

SILVA, L.F.O; WOLLENSCHLAGER, M., OLIVEIRA, M.L.S. A preliminary study of coal mining drainage and environmental health in the Santa Catarina region, Brazil. **Environ. Geochem. Health** 33, 55–65. 2011 (a).

SILVA, L.F.O; IZQUIERDO, M; QUEROL, X; FINKELMAN, R.B; OLIVEIRA, M.L.S; WOLLENSCHLAGER, M; TOWLER, M; PÉREZ-LÓPEZ, R; MACIAS, F. Leaching of potential hazardous elements of coal cleaning rejects. **Environ Monit Assess.** 175:109–126 DOI 10.1007/s10661-010-1497-1, 2011 (b).

SIMÃO, G. **O Carvão da camada Bonito, jazida Sul Catarinense: uma contribuição para a caracterização petrográfica, química e tecnológica.** Monografia (Graduação em Geologia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2012.

SIMONA, R., ANDREAS, B., & STEFAN, P. Formation and stability of schwertmannite in acidic mining lakes. **Geochimical Cosmochimica Acta**, 68, p.1185– 1197, 2004.

SMITH, A.R.; PRYER, K.M.; SCHUETTPELZ, E.; KORALL, P.; SCHNEIDER, H. & WOLF, P.G. **A classification for extant ferns.** *Taxon* 55(3): 705-731, 2006.

SMITH, A.R.; PRYER, K.M.; SCHUETTPELZ, E.; KORALL, P.; SCHNEIDER, H. & WOLF, P.G. **Fern classification**, p. 417-467. In: T.A. Ranker & C.H. Haufler (Eds.), *Biology and evolution of ferns and lycophytes*. Cambridge University Press, 2008.

STOFFREGEN, R.E., ALPERS, C.N., JAMBOR, J.L. Alunite–jarosite Crystal lography, thermodynamics, and geochronology. **Rev. Mineral.** 40, 453–479, 2000.

TEDESCO, M. J.; BASSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. Departamento de Solos Universidade Federal do Rio Grande do Sul. RS, p. 174, 1995.

TORREZANI, N.C.; OLIVEIRA, E.F.de. **Problemas ambientais decorrentes da exploração do carvão mineral e a aplicação da ecotoxicologia aquática como ferramenta de biomonitoramento.** O ecologia Australis 17(4): 509-521. 2013.

TRYON, R.M. **Development and evolution of fern floras of Oceanic Islands.** Biotropica 2(2):76-84. 1970.

UNESC. **Histórico de Criciúma.** Disponível em: <http://www.unesc.rct.sc.br/criciuma/historicohtml>, 1998. Acesso em: 15 novembro de 2014.

USEPA. **Technical document of acid mine drainage prediction.** Office of Solid Waste, Washington, USA; p. 48, 1994.

ZHAO, E.J.; DUNHAM, S.J.; McGRATH, S.P. Arsenic hyperaccumulation by diferente fern species. **New Phytologist**,v.156, n. 1, p. 27-31. Oct. 2002.

WHITTIER, D.P. The initiation of sporophytes by obligate apogamy in *Cheilanthes castânea*. **American Journal of Botany**, 57: p.1249-1254, 1970.

YU, J., HEO, B., CHOI, I., CHANG, H. Apparent solubilities of schwertmannite and ferrihydrite in natural stream Waters polluted by mine drainage. **Geochim. Cosmochim. Acta** 63, 3407–3416, 1999.

**YUE, M., & ZHAO, F. Leaching experiments to study the release of trace elements from mineral separates from Chinese coals. *International Journal of Coal Geology*, 73, p. 43–51, 2008.**