

HELOIZA MÁRCIA FERNANDES HORN

ANÁLISE DE SÍLICO-FITÓLITOS DE EUDICOTILEDÔNEAS  
EM ÁREA DE MINERAÇÃO E SEU POTENCIAL NA  
FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTENDO METAIS  
PESADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Produção Vegetal.

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Professor Regynaldo Arruda Sampaio

Coorientador: Professor Adolf Heinrich Horn

Montes Claros  
2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

F363a Fernandes-Horn, Heloiza Márcia.

Análise de sílico-fitólitos de Eudicotiledôneas em área de mineração e seu potencial na fitorremediação de solos contendo metais pesados/ Heloiza Márcia Fernandes Horn. Montes Claros, MG: ICA/UFMG, 2016.

83 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Produção Vegetal, Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Regynaldo Arruda Sampaio.

Banca examinadora: Regynaldo Arruda Sampaio, Hernando Baggio Filho, Luiz Arnaldo Fernandes.

Inclui referências: f. 76-83.

1 Silico-fitólitos. 2 Metais pesados 3 Descontaminação de solos. I I. Sampaio, Regynaldo Arruda. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4

HELOIZA MÁRCIA FERNANDES HORN

ANÁLISE DE SÍLICO-FITÓLITOS DE EUDOCOTILEDÔNEAS EM  
ÁREA DE MINERAÇÃO E SEU POTENCIAL NA FITORREMEDIAÇÃO DE  
SOLOS CONTENDO METAIS PESADOS

---

Prof. Dr. Reginaldo Arruda Sampaio  
(Orientador – ICA/UFMG)

Aprovada em 29 de abril de 2016.

Dedico este trabalho,  
aos meus pais Antônio (*in memoriam*) e  
Luzia, e a minha neta Catharine.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me proporcionado mais esta oportunidade de crescimento e conhecimento.

À minha Família, que sempre apoia as minhas realizações.

À Universidade Federal de Minas Gerais, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias pela oportunidade de realização desse trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Ao professor Dr. Regynaldo Arruda Sampaio, meu orientador, pelos ensinamentos a mim transferidos, os quais foram muito importantes para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao professor Dr. Heinrich Adolf Horn, meu coorientador, pelo grande apoio, amizade e incentivo. A transferência de seus conhecimentos foi de grande relevância para a realização deste trabalho.

À Mineração Carpathian Gold pelo apoio logístico e pelo fornecimento de dados e informações técnicas de grande valia para o desenvolvimento desta Dissertação.

Ao colega Márcio Rodrigues Neves, aos acadêmicos Paulo Henrique S. Cardoso, Izabelle Sousa, Adelaide Cristielle e demais colegas que me ajudaram nos trabalhos realizados no Laboratório de Resíduos do ICA.

Aos professores do ICA que em muito contribuíram para o meu conhecimento técnico-científico e profissional.

Ao colega William de Figueiredo Santos, responsável pela análise das amostras no ICP-OES, e à bolsista-BIC, acadêmica Luana Duarte pela preparação e dissolução dos fitólitos para ICP-OES do Núcleo de Geoquímica Ambiental – NGqA do CPMTc do IGC - UFMG.

Aos colegas do curso de mestrado pelas parcerias e amizades.

Ao professor. Dr. Hernando Baggio Filho pelas análises de FRX no LGA -Laboratório de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri e pela grande colaboração e opiniões valiosas.

Ao professor Dr. Igo Lepsch, pelo incentivo, colaborações e amizade.

Ao professor Dr. Luiz Arimura Figueiredo (UNIMONTES) e família pela acolhida e amizade.

Ao professor Dr. Essaid Bilal – École des Mines, França, agradeço pela colaboração e amizade e também pelo grande incentivo.

À Priscilla Gonçalves, Edvaldo C. Souza e demais servidores do ICA que de forma direta ou indireta me auxiliaram.

Agradeço ao engenheiro Márcio Luiz Crocco, Flávia Alves, Christine Carvalho e demais colegas do Consórcio CCS pelo carinho e amizade.

**Agradecimentos especiais:** agradeço muitíssimo a minha irmã Bia pelo grande exemplo de coragem, perseverança e fé; a minha amiga Soledade Lima pelo grande apoio e acolhida e ao meu esposo Heiner por tudo que significa para mim.

Muito obrigada!

## RESUMO

As atividades antrópicas, como a indústria e a agricultura, utilizam em suas atividades grandes quantidades de metais classificados como metais pesados. Na natureza esses metais ocorrem em quantidades normalmente pequenas e muito distribuídas, sendo por isso, denominados de elementos traços. Ao serem concentrados em processos e atividades antropogênicas, as quantidades liberadas no ambiente podem ser expressivas. Esses metais não são biodegradáveis, podendo acumular-se no meio ambiente. Mesmo em baixas concentrações, são capazes de causar distúrbios metabólicos e doenças crônicas nos seres vivos. Quando esses elementos entram na cadeia trófica, as suas concentrações podem ser aumentadas à medida que passam dos níveis tróficos inferiores aos níveis tróficos superiores (biomagnificação). Metais como Pb, Cd e Hg são classificados como não essenciais e outros como Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo, Ni, Co, Cr, Se e Sn são indispensáveis para animais e/ou plantas. Técnicas de fitorremediação já são bastante conhecidas e empregadas, porém estudos utilizando Si-fitólitos limitam-se a algumas plantas da família *Poaceae*. O presente trabalho foi desenvolvido no Cerrado em uma área localizada no norte do estado de Minas Gerais no entorno da mina de ouro da empresa Carpathian Gold no município de Riacho dos Machados. Nesta região ocorreu durante o Pré-Cambriano intenso hidrotermalismo impregnando as rochas com concentrações altas de metais pesados disseminados e em zonas específicas, ultrapassando localmente os valores estabelecidos pela legislação ambiental vigente no Brasil. O objetivo deste trabalho foi selecionar plantas que possuam potencial para formar Si-fitólitos e a capacidade de absorver metais pesados e retê-los nesses biominerais. Foram identificadas cinco espécies da Classe Eudicotiledôneas típicas do Bioma Cerrado, a citar: *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha*, *Sida sp*, *Senna obtusifolia*, e *Solanum capsicoides*. Dentre as espécies coletadas duas foram desconsideradas: *Senna obtusifolia*, *Solanum capsicoides*, devido à perda de massa foliar no período de menor precipitação pluviométrica. As espécies selecionadas para serem investigadas foram: *Piptadenia gonoacantha*,

*Rollinia leptopetala* e *Sida* sp. Foram coletadas 18 amostras de solos e 45 amostras de plantas para posterior extração dos Si-fitólitos e para análise química dos metais selecionados nos mesmos. As amostras de solos, coletadas no entorno das plantas amostradas (localidades 1-9) numa profundidade entre 3-10 cm foram analisadas para metais totais e disponíveis e deles foram extraídos também Si-fitólitos. Os resultados revelaram que as espécies estudadas concentraram os metais selecionados nos Si-fitólitos. As concentrações variaram para os diversos órgãos da planta (raízes, caules e folhas). Os órgãos das plantas concentraram elementos de formas diferenciadas nas três espécies estudadas. Onde há maior concentração no solo, há também a maior concentração nos Si-fitólitos (plantas, solo). As plantas investigadas podem ser utilizadas para a descontaminação de metais em solos. O melhor aproveitamento foi obtido com as espécies *Rollinia leptopetala* e *Piptadenia gonoacantha* com teores superiores. As maiores concentrações de metais ocorreram em Si-fitólitos das folhas seguidas dos caules e raízes. Os Si-fitólitos extraídos do solo (com pequenas quantidades de outros compostos como óxidos, argilas >1-3 %) mostram concentrações médias comparáveis às concentrações médias das plantas estudadas. Variações anormais de concentrações de metais em Si-fitólitos, não correlacionados com os parâmetros investigados, podem ser atribuídas às condições climáticas extremas no ano de estudo.

Palavras-chave: Biorremediação. Biominerais. Opala biogênica. Poluição do solo. Descontaminação de solos.



## ABSTRACT

Anthropogenic activities such as industry and agriculture use in large-scale metals activities classified as heavy metals. In nature, these metals occur normally in small quantities and in a distributed form and therefore they are called trace elements. By being concentrated on processes in anthropogenic activities, the quantities released into the environment may be significant. These metals are not biodegradable and can accumulate in the environment. Even at low concentrations, they are able to cause metabolic disorders and chronic diseases in living beings. When these elements enter the trophic chain, their concentrations may be magnified as they pass from lower to upper trophic levels (biomagnification). Metals such as Pb, Cd and Hg are classified as non-essential and others, such as Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo, Ni, Co, Cr, Se and Sn are indispensable to animals and/or plants. Phytoremediation techniques are well known and often employed, but studies using Si-Phytoliths are limited to a few plants of the Poaceae family. The present work was developed in the Cerrado in an area located in the North of the Minas Gerais State, in the surroundings of the gold mine of Carpathian Gold Company, in the municipality of Riacho dos Machados. In this region occurred during the Precambrian intense hydrothermalism impregnating the rocks with high concentrations of heavy metals distributed in disseminated form or concentrated in specific zones, exceeding locally the values established by Brazilian current environmental legislation. The aim of this work was to select plants that have the potential to form Si-Phytoliths and the capacity to absorb heavy metals and contain them in these bio minerals. They were identified five species of Eudicots Class typical of the Cerrado biome, quote: *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonocantha*, *Sida sp.*, *Senna obtusifolia* and *Solanum capsicoides*. Two of these collected species were excluded: *Senna obtusifolia* and *Solanum capsicoides*, due to leaf mass loss in the dry period. The species selected that were investigated: *Piptadenia gonocantha*, *Rollinia leptopetala* and *Sida sp.* 18 soil and 45 plants samples were collected for later extraction of Si-Phytoliths and chemical analysis of selected metals in them. Soil samples collected around the location of plants sampled (number

1-9) at a depth between 3-10 cm were analyzed for total and available metals, and from them were also extracted Si-Phytoliths. The results revealed that the studied species have concentrated the selected metals in the Si-Phytoliths. The concentrations varied for the different organs of the plant (root, stem and leaves). The organs of the three studied species concentrated the elements in different quantities. The highest concentration in the soil coincided with the highest concentrations in Si-Phytoliths (from plants or soil). The plants investigated therefore can be used for the decontamination of metals in soils. The best effect was obtained with the species *Rollinia leptopetala* and *Piptadenia gonocantha* with higher levels. The largest concentrations of metals occurred in Si-Phytoliths of sheets then stems and roots. The Si-Phytoliths extracted from the soil (with small amounts of other compounds like oxides, clays >1-3%) show average concentrations comparable to the average values of studied plants. Some abnormal changes of metals concentrations in Si-Phytoliths, not correlated to the investigated parameters, can be assigned to the extreme weather conditions in the year of study.

Keywords: Bioremediation; bio minerals; biogenic opal; soil pollution; soil decontamination.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARS – Agriculture Research Service

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPMTC – Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa

FRX - Fluorescência de raio-X

GPS – Global Position System

ICA– Instituto de Ciências Agrárias

ICP-OES – Espectrometria ótica de emissão com plasma indutivo acoplado

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LGA – Laboratório de Geoquímica

MP – Metal pesado

NGqA – Núcleo de Geoquímica Ambiental

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFVJM – Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri

US-EPA – United States Environmental Protection Agency

UTM - Universal Transversa de Mercator

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> - Localização e vias de acesso à cidade de Riacho dos Machados  | 26 |
| <b>Figura 2</b> - Coluna estratigráfica simplificada das rochas da região em estudo   | 29 |
| <b>Figura 3</b> - Mapa geológico da região em questão com a localidade da investigação assinalada   | 31 |
| <b>Figura 4</b> - Mapas com isolinhas da concentração dos metais pesados selecionados   | 41 |
| <b>Figura 5</b> - Imagens das espécies identificadas e selecionadas na área estudada  | 45 |
| <b>Figura - 6</b> Microfotografias de algumas amostras de plantas com fitólitos<br>As figuras mostram os diversos morfotipos observados   | 53 |
| <b>Figura 7</b> - Distribuição dos elementos investigados nos pontos indicados nos mapas de isolinhas   | 54 |
| <b>Figura 8</b> - Distribuição dos metais pesados em órgãos das espécies <i>Rollinia leptopetala</i> , <i>Piptadenia gonoacantha</i> e <i>Sida sp</i>   | 56 |
| <b>Figura 9</b> - Diagrama semi-logarítmico das concentrações de metais pesados em fitólitos extraídos das amostras de solos  | 58 |
| <b>Figura 10</b> - Distribuição de metais selecionados (Cu, Pb e Zn) em órgãos das espécies <i>Rollinia leptopetala</i> , <i>Piptadenia gonoacantha</i> e <i>Sida sp</i>                      | 62 |
| <b>Figura 11</b> - Distribuição de Cu, Pb e Zn nos órgãos das espécies <i>Rollinia leptopetala</i> , <i>Piptadenia gonoacantha</i> e <i>Sida sp</i> .   | 65 |
| <b>Figura 12</b> - Relação da concentração de metais selecionados (Ba, Cr, Co, Cu, Cd, Ni, Pb e Zn) em amostras do solo e amostras dos fitólitos das plantas (concentração média das plantas) | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Resultados das análises físicas e químicas das amostras coletadas   | 35 |
| <b>Tabela 2</b> - Concentrações totais, mínimas e máximas disponíveis em $\text{mg kg}^{-1}$ dos elementos no solo  | 36 |
| <b>Tabela 3</b> - Indicação dos locais da amostragem e identificação de campo referente aos locais de coleta  | 38 |
| <b>Tabela 4</b> - Órgãos das plantas investigadas e a sua localização exata em torno dos pontos de referência de 1 a 9  | 39 |
| <b>Tabela 5</b> - Localização e identificação das amostras coletadas no campo   | 42 |
| <b>Tabela 6</b> - Principais características das espécies identificadas na área estudada: <i>Rollinia leptopetala</i> Refr., <i>gonoacantha</i> e <i>Sida</i> sp.   | 44 |
| <b>Tabela 7</b> - Concentrações médias de elementos químicos em sílico-fitólitos nos órgãos (folhas, raízes e caules) das espécies <i>Rollinia leptopetala</i> , <i>Sida</i> sp e <i>Piptadenia gonoacantha</i> | 55 |
| <b>Tabela 8</b> - Concentrações de metais em sílico-fitólitos coletados na área de estudo   | 59 |
| <b>Tabela 9</b> - Concentração de metais ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nos pontos de amostragem   | 59 |
| <b>Tabela 10</b> - Relação entre espécies, órgãos das plantas e metais enriquecidos e concentrações atingidas   | 60 |
| <b>Tabela 11</b> - Relação entre peso seco e quantidade de Si-fitólitos. O peso seco da planta inicial calculado de 1kg   | 66 |

## SUMÁRIO

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | INTRODUÇÃO.....  | 15 |
| 2       | REVISÃO DE LITERATURA .....                            | 16 |
| 2.1     | Silício .....  | 16 |
| 2.1.1   | Silício na Planta.....                                 | 16 |
| 2.1.2   | Estudos sobre Silício .....                            | 18 |
| 2.2     | Fitólitos .....  | 18 |
| 2.2.1   | Estudos sobre Fitólitos .....                          | 19 |
| 2.2.2   | Uso de Fitólitos.....                                  | 22 |
| 2.3     | Fitorremediação.....                                   | 23 |
| 3       | OBJETIVOS .....  | 24 |
| 3.1     | Objetivo geral.....                                    | 24 |
| 3.2     | Objetivos específicos .....                            | 24 |
| 4       | MATERIAL E MÉTODOS .....                               | 25 |
| 4.1     | Caracterização da área de estudo .....                 | 25 |
| 4.1.1   | Localização.....                                       | 25 |
| 4.1.2   | Aspectos Fisiográficos.....                            | 26 |
| 4.1.2.1 | Clima .....  | 26 |
| 4.1.2.2 | Hidrografia .....                                      | 27 |
| 4.1.2.3 | Geologia .....   | 27 |
| 4.1.3   | Morfologia da área .....                               | 33 |
| 4.1.4   | Solos .....  | 33 |
| 4.1.5   | Uso da Terra.....                                      | 36 |
| 4.1.6   | Vegetação.....   | 37 |
| 4.2     | Amostras de plantas e solos .....                      | 37 |
| 4.2.1   | Localização dos Pontos de Amostragem das Plantas ..... | 37 |
| 4.2.2   | Localização das Amostragens de Solos .....             | 40 |
| 4.2.3   | Caracterização das Plantas Amostradas .....            | 43 |
| 4.3     | Metodologia de coleta das amostras .....               | 46 |
| 4.3.1   | Coleta das amostras das plantas.....                   | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 4.3.2 Coleta das amostras de solos .....  | 47 |
| 4.4 Preparação das amostras.....  | 48 |
| 4.4.1 Extração dos Sílico-fitólitos em Plantas .....  | 48 |
| 4.4.2 Extração dos Sílico-fitólitos em solos .....  | 49 |
| 4.5 Análises dos metais pesados nas amostras .....  | 50 |
| 4.5.1 Análises dos sílico-fitólitos por ICP-OES .....   | 50 |
| 4.5.2 Análises das amostras de solos.....   | 50 |
| 4.5.2.1 Análise por FRX .....   | 50 |
| 4.5.2.2 Análise por ICP-OES .....   | 51 |
| 4.6 Tratamento dos dados obtidos.....   | 51 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....   | 52 |
| 5.1 Formas de fitólitos encontrados nas espécies analisadas.....  | 52 |
| 5.2 Concentrações de metais pesados no solo .....   | 53 |
| 5.3 Concentrações de metais pesados nos fitólitos das plantas .....   | 54 |
| 5.4 Concentrações de metais pesados nos sílico-fitólitos nos solos.....   | 58 |
| 5.5 Distribuição dos elementos selecionados em sílico-fitólitos nos órgãos das plantas investigadas .....             | 59 |
| 5.6 Relação entre material orgânico e fitólitos .....   | 65 |
| 5.7 Disponibilidade dos metais selecionados para as plantas em comparação com as concentrações dos Si-Fitólitos ..... | 66 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....   | 68 |
| 7 CONCLUSÕES.....   | 71 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 73 |

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas implementadas após o início da Era Industrial vêm contribuindo significativamente para o aumento das concentrações de metais pesados nos ecossistemas. No entanto, é inegável a importância que esses metais têm para o desenvolvimento da economia e para a geração e produção de bens de consumo para a humanidade.

Na natureza a ocorrência de alguns desses metais está em concentrações mínimas, o que permite classificá-los como elementos traços. Porém, por meio de atividades antrópicas, as concentrações podem se tornar expressivas e nem sempre há políticas efetivas que indiquem o descarte e ou tratamento de resíduos com potencial de contaminação do ambiente por metais pesados.

Dentre os componentes da natureza, os solos representam uma grande preocupação para os técnicos e pesquisadores, pois é considerado como um compartimento muito específico na biosfera. Isso não só porque é um dos depósitos geoquímicos finais de contaminantes, mas também por agir como tampão natural no controle do transporte de elementos químicos e substâncias para a atmosfera, hidrosfera e biota. No solo, os metais pesados podem ser encontrados em diferentes formas e graus de disponibilidade para as plantas.

Face a essa realidade, diversos procedimentos têm sido propostos para minimizar os efeitos negativos nos ecossistemas, como, por exemplo, as técnicas de biorremediação. Dentre essas técnicas, a fitorremediação tem sido utilizada para mitigar áreas de mineração, áreas industriais e outras, em seu entorno, contaminadas por metais pesados.

A fitorremediação consiste na utilização de plantas e de microrganismos a elas associados para a recuperação de áreas poluídas ou contaminadas, por meio da degradação e, ou sequestro de poluentes. Além de eficiente, a fitorremediação é uma tecnologia ecologicamente correta e tem boa aceitação pelo público. Dentre as diversas modalidades de fitorremediação destacam-se: rizoextração, fitoextração, fitotransformação, fitoestabilização, fitovolatilização e fitorremediação por fitólitos.



As plantas, notadamente as pertencentes à família *Poaceae*, são as principais acumuladoras de silício e produtoras de biominerais. O silício é geralmente depositado nas folhas e convertido em pequenos grânulos, denominados fitólitos. Dentre outras funções, os fitólitos imobilizam os metais pesados no interior de suas estruturas e diminuem a sua toxidez, evitando ou retardando a poluição dos ecossistemas pelos metais e a consequente contaminação dos seres vivos.

O objetivo deste trabalho foi determinar a concentração de metais pesados no solo e em sílico-fitólitos de plantas crescidas em área contendo teores elevados desses elementos e, assim, averiguar o potencial dessas espécies para o uso na fitorremediação de solos contaminados.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 SILÍCIO**

#### **2.1.1 Silício na Planta**

O silício é absorvido pela planta na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) juntamente com a água (fluxo de massa) e se acumula principalmente nas áreas de máxima transpiração (tricomas, espinhos etc.) como ácido silícico polimerizado (sílica amorfa) (SAVANT *et al.*, 1997).

Ma *et al.* (2001) definem como plantas acumuladoras de silício aquelas que possuem teor foliar acima de 1% e, não acumuladoras, plantas com teor de silício menor que 0,5%. Após a absorção, o Si é translocado para o xilema e tem tendência natural a se polimerizar. De acordo com esses autores, normalmente o Si se concentra nos tecidos de suporte, do caule e nas folhas, mas pode também ser encontrado em pequenas quantidades nos grãos.

Em geral, o conteúdo médio de silício das raízes é menor do que no caule e nas folhas (OLIVEIRA *et al.*, 2002). A maior parte do Si absorvido é incorporada na parede celular, principalmente nas células da epiderme (estômatos e tricomas), ou é depositado juntamente com outros elementos, originando depósitos amorfos chamados de fitólitos ou sílica biogênica (JONES; HANDRECK, 1967).

O depósito de Si absorvido é influenciado por diversos fatores como a idade da planta, o tipo e a localização dos tecidos envolvidos e a absorção por meio das raízes, além da transpiração. A deposição de Si na cutícula das folhas proporciona às plantas proteção e minimiza os efeitos adversos, tanto daqueles de origem biótica quanto dos de natureza abiótica (EPSTEIN, 1999). Dessa forma, o silício contribui para a nutrição mineral das plantas, bem como confere maior resistência mecânica das plantas ao tombamento, à incidência de doenças fúngicas e a ataques de insetos (HODSON; SANGER, 2002; FAUTEUX *et al.*, 2005; AGUIRRE *et al.*, 2007). Além desses papéis importantes, o Si confere às plantas maior tolerância à toxidez por metais pesados (BRINGEZU *et al.*, 1999; EPSTEIN, 1999; VIEIRA *et al.*, 2008).

O Si ocorre com maior frequência nas partes das plantas onde a água é transpirada em grande quantidade, ou seja, na epiderme junto às células-guarda dos estômatos e em outras células epidérmicas, contribuindo para uma maior redução na taxa de transpiração (DAYANANDAM *et al.*, 1983).

A distribuição dos depósitos de Si nas plantas tem uma relação direta com a espécie vegetal e fatores climáticos (precipitação e temperatura, principalmente) existentes na área onde a planta se desenvolve (WRANG *et al.*, 1998). Segundo Takahashi *et al.* (1995), em ambientes como o Cerrado, a acumulação de Si nos órgãos de transpiração provoca a formação de uma dupla camada de sílica, causando a redução dos índices de transpiração devido à redução da abertura dos estômatos, diminuindo, portanto, a perda de água.

Uma boa parte das plantas nativas da vegetação do Cerrado é considerada acumuladora de Si, apesar dos solos serem pobres nas formas disponíveis desse elemento para as plantas (KORNDÖRFER *et al.*, 1999). De acordo com esses autores, os fatores que concorrem para as elevadas taxas de acumulação de Si são: o alto índice de evapotranspiração, sistema radicular profundo e elevada ciclagem do Si, que ocorre por meio da queda e decomposição das folhas sobre a superfície do solo, e a transformação do Si em formas novamente assimiláveis.

A deposição e acumulação de silício intra e extracelular das plantas podem levar à formação de determinadas estruturas, conhecidas por fitólitos

(JONES; HANDRECK, 1967; KONDO; SASE, 1986; COSTA, 2005). Essas acumulações são constituídas por sílica, oxalatos ou carbonatos (JONES; HANDRECK, 1967).

### 2.1.2 Estudos sobre Silício

Os corpos silicosos podem ser utilizados para determinar a idade de camadas de sedimentos, pois o C nele ocluso fica preservado por muito tempo, principalmente em ambiente redutor. Parr & Sullivan (2005) observaram o acúmulo de 0,72 a 0,88 g m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> de C na forma de C ocluso em fitólitos sob vegetação natural em dois locais na Oceania.

Diversas áreas das ciências, como a Botânica, a Arqueologia, a Paleontologia, Geologia, Microscopia, Ecologia e outras desenvolvem estudos sobre corpos silicosos.

O principal foco de estudos sobre a sílica em áreas agrícolas é em relação a sua importância na sustentação das plantas, principalmente as monocotiledôneas (AGARIE *et al.*, 1996), e na sua atuação na proteção das plantas contra ataques de insetos e herbívoros, e também de patógenos (JONES; HANDRECK, 1967; EPSTEIN, 1999). Além da tolerância a diversos tipos de *stress*, alguns autores consideram que o uso da sílica como fertilizante promove o aumento da produção de biomassa e a produtividade de grãos. (KORNDÖRFER *et al.*, 1999; BARBOSA FILHO *et al.*, 2001; MAUAD *et al.*, 2003).

### 2.2 Fitólitos

Os fitólitos são estruturas microscópicas, amorfas aos raios-X, também descritas como corpos silicosos ou opalas biogênicas ou corpúsculos de opalina de sílica (KONDO; SASE, 1986). Essas estruturas de sílica (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O) são formadas durante o ciclo vegetativo das plantas (PIPERNO, 1988, 2006). Segundo Wilding & Drees (1971), além de silício, os fitólitos podem conter expressivas concentrações de outros elementos, como metais pesados. Alguns animais (esponjas) também produzem corpos silicosos,

sendo denominados de espículas. As algas, especialmente as diatomáceas também produzem corpos silicosos, recebendo a denominação de frústula (HILDEBRAND, 2003).

### 2.2.1 Estudos sobre Fitólitos

O primeiro trabalho desenvolvido sobre fitólitos foi publicado por Struve no ano de 1835 e, a partir de então, os fitólitos constituíram-se em objeto de estudo de grande número de botânicos alemães no início do Século XX (PIPERNO, 2006). A partir da Década de 1970, um grupo de arque-botânicos começou a explorar a potencialidade da análise dos fitólitos nas reconstruções paleoambientais, e tiveram que reiniciar as pesquisas e entender os complexos processos de formação, acumulação e identificação desses biominerais (PIPERNO, 1991).

O ácido monossilícico  $[\text{Si}(\text{OH})_4]$  é um soluto em estado monomérico que existe sobre grande parte da superfície da Terra (ILER, 1979). Ele é abundante nos solos, onde as plantas o absorvem através das raízes e o distribuem como um dos vários componentes SAP (água com os açúcares dissolvidos e sais minerais), que circula no sistema vascular da planta para brotos e folhas por meio do fluxo de transpiração (LEWIN; REIMANN, 1969).

A produção de fitólitos está intimamente ligada às características filogenéticas das espécies, em que os mesmos se desenvolvem e são influenciados diretamente pelas condições do ambiente como temperatura, luz e umidade (BERTOLDI, 1975; ZUCOL, 2001). Segundo Raven (1983) e Epstein (1994), os processos que dão origem à formação dos fitólitos ocorrem de forma irreversível. A concentração do Si nas plantas é diretamente influenciada pelo teor desse elemento no solo, bem como, pela presença de outros elementos que possam ser encontrados nos fitólitos, definindo assim a sua composição (DING *et al.*, 2005; HENRIET *et al.*, 2008).

As espécies vegetais pertencentes à família *Poaceae* são as principais acumuladoras de Si e produtoras de fitólitos, no entanto, outras famílias de Monocotiledôneas e algumas Eudicotiledôneas também acumulam quantidades expressivas de silício (RUNGE, 1999). De acordo com Madella

(2008), os fitólitos são formados pela planta a partir da absorção do  $\text{Si(OH)}_4$ , presente na solução do solo. No solo, segundo o autor, os fitólitos são depositados por meio dos resíduos vegetais, ricos nessas estruturas.

A deposição de fitólitos pelos restos vegetais é suficiente para alterar as concentrações de Si no solo (MEUNIER, 2003). Dessa forma, o entendimento dos processos que causam as diferentes distribuições de corpos silicosos no solo é essencial para a interpretação dos possíveis fatores ambientais responsáveis pela estabilidade, deposição de sedimentos, formação de Paleossolos e para análise de sítios arqueológicos (COSTA, 2005).

Na seiva das plantas, o ácido silícico combina quimicamente com outros monômeros para produzir uma molécula de rede, um gel de sílica polimerizada ( $\text{SiO}_2$ ), que, em algumas famílias, pode atingir concentrações consideráveis que variam de uma fração de 1% de matéria seca, podendo chegar a algumas plantas a 10% do peso seco da planta ou até mesmo a valores mais elevados. Em nível nanométrico o gel solidifica dentro e entre as células, formando corpos de sílica amorfa, denominados fitólitos. Em muitas espécies, esses precipitados de sílica biomineralizados não cristalinos são um importante constituinte mineral da planta, embora nem todas as plantas o produzam (EPSTEIN, 1994; SNYDER *et al.*, 2007).

Segundo Elbaum *et al.* (2003), a densidade dos fitólitos varia entre 1,5 - 2,3  $\text{g/cm}^3$ . Os fitólitos são partículas altamente polimórficas e possuem as mesmas propriedades ópticas em todas as direções e um índice de refração de 1,4. A coloração dos fitólitos é influenciada diretamente pela extensão do revestimento de carbono. As cores podem ser claras, castanho-pigmentado ou mesmo totalmente opacos (PRYCHID *et al.*, 2004).

Após a morte das plantas e sua decomposição, os silico-fitólitos existentes em sua constituição retornam ao solo. Como exemplo, pode-se citar um evento registrado nas selvas da República Popular do Congo, África, onde 74% do Si solúvel são originários da dissolução de fitólitos (MEUNIER, 2003).

Ao longo de sua evolução, algumas plantas desenvolveram estratégias de tolerância a *stress* bióticos e abióticos, sendo que, uma dessas estratégias

foi a produção de fitólitos no interior e nas camadas minerálicas externas da planta, como mecanismo de tolerância a elevadas concentrações de metais pesados (JONES; HANDRECK, 1967; KONDO; SASE, 1986; COSTA *et al.*, 2005).

Tanto em espécies lenhosas quanto nas gramíneas, os fitólitos atuam na regulação do *stress* causado por elementos tóxicos. Em coníferas, o Si permite a passagem de Al para o tecido na superfície, sem evidência de toxicidade, o que é explicado pela precipitação de Fe e Al com este elemento (BIRCHALL, 1995; HODSON; EVANS, 1995; HODSON; SANGER, 1999). Esse papel do Si em atenuar a toxicidade do elemento foi também observado em *Erica andevalensis* (TURNAU, 2007).

A espécie *Erica andevalensis* cresce espontaneamente em áreas de mineração, com elevadas concentrações de elementos tóxicos, como o arsênio (MONTES-BOTELLA, 2001; BUJÁN *et al.*, 2007; TURNAU *et al.*, 2007; ABREU *et al.*, 2008; MÁRQUEZ-GARCIA, 2008; ROSSINI-OLIVA *et al.*, 2009). Diferentes mecanismos têm sido propostos para explicar a capacidade de *E. andevalensis* de viver sob essas condições extremas, como, por exemplo, a associação com fungos micorrízicos que sequestram os metais e assim reduzem a sua biodisponibilidade (TURNAU, 2007), e o sequestro dos metais por Si no vacúolo das células vivas ou na parede celular (MONTES-BOTELLA, 2001). Ainda com a espécie *E. andevalensis*, Rossini *et al.* (2011) verificaram a presença de Cu em fitólitos, sugerindo serem essas estruturas um mecanismo de imobilizar metais pesados.

A deposição de sílica biogênica pode ocorrer em todas as partes dos vegetais como folhas, sementes, frutos, raízes e parte lenhosa, dentro das células ou na parede celular, ou em outras células especializadas (SENDULSKY; LABOURIAU, 1966; RUNGE, 1999). O local no qual a sílica se deposita nas células pode definir morfologias únicas aos fitólitos, o que permite o seu uso na identificação de espécies produtoras até ao nível de Família ou mesmo de Gênero (PARRY; SMITHSON, 1964; SENDULSKY; LABOURIAU, 1966; CAMPOS; LABOURIAU, 1969; SILVA; LABOURIAU, 1970; PIPERNO, 2006; CALEGARI, 2008). Assim, os fitólitos separados de

solos e sedimentos podem ser utilizados na reconstituição da paleovegetação e do paleoclima (RUNGE, 1999).

No Brasil, os estudos pioneiros foram realizados por Sendulsky e Labouriau (1966), Campos e Labouriau (1969), Silva e Labouriau (1970), que descreveram corpos silicosos em gramíneas do cerrado. Os mais recentes foram realizados pelos pesquisadores: Monteiro, M. R., Universidade Estadual de Maringá, PR; Coe, H., Universidade Estadual do Rio de Janeiro, RJ e Calegari, MR., Universidade Estadual do Oeste do Paraná, PR.

Segundo Lucas *et al.* (1993); Alexandre *et al.* (1997); Carnelli *et al.* (2002) e Calegari (2008), no Brasil, tem havido poucas pesquisas referentes à identificação de corpos silicosos em solos e em sedimentos para se conhecer a gênese do solo e também na influência das plantas no aporte constante de sílica biogênica nos solos para que o equilíbrio químico na solução do solo seja conservado dentro dos níveis adequados para a manutenção de minerais silicatados.

### **2.2.2 Uso de Fitólitos**

Os corpos silicosos podem ser utilizados para determinar a idade de camadas de sedimentos, pois o carbono neles oclusos fica preservado por muito tempo, principalmente em ambiente redutor (PARR; SULLIVAN, 2005). Esses autores observaram o acúmulo de 0,72 a 0,88 g m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> de C na forma de C ocluso em fitólitos sob vegetação natural em dois locais na Oceania.

Diversas áreas das ciências, como a Botânica, a Arqueologia, a Paleontologia, Geologia, Microscopia, Ecologia e outras desenvolvem estudos sobre corpos silicosos, uma vez que são relativamente estáveis nos solos e resistem à dissolução por milhares de anos (RUNGE, 1999).

Os fitólitos estão sendo usados na indústria na fabricação de alto-falantes de carros de luxo para obtenção de som com alta fidelidade sob condições extremas de uso. Um exemplo é o uso dos fitólitos de bambu para o alto-falante do veículo modelo *Genesis Nexus 7- Hyundai* (A autora).

Na arqueologia e paleontologia usam-se fitólitos pra a reconstrução de paleoambientes e para avaliação da situação nutricional de animais e hominóides, enquanto que, na agronomia, podem ser usados para obter informações sobre as condições que algumas plantas sofreram durante o cultivo e também para a redistribuição de micronutrientes semelhantemente ao uso de sílica agrícola (A autora).

### 2.3 Fitorremediação

Entre as técnicas de biorremediação de solos contaminados, a fitorremediação tem sido utilizada para remover, imobilizar ou tornar os contaminantes inofensivos ao ecossistema (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Por fitorremediação entende-se a utilização de plantas e de microrganismos a elas associados para a recuperação de áreas poluídas ou contaminadas. Serve-se dos processos naturais pelos quais as plantas e os microrganismos da rizosfera degradam e sequestram os poluentes. É uma tecnologia eficiente de recuperação para uma grande variedade de poluentes, sejam eles orgânicos ou inorgânicos (CUNNINGHAM *et al.*, 1996).

A técnica da fitorremediação tem sido utilizada para minimizar a contaminação dos solos com metais pesados. Entende-se por metais pesados aqueles elementos que possuem densidade superior a  $6 \text{ g.cm}^{-3}$  ou raio atômico maior que 20, incluindo alguns ametais ou semi-metais, como As e Se (MEURER, 2004). Alguns metais pesados são essenciais ou benéficos aos seres vivos como Cu, Zn, Mn, Co, Mo e Se.

Os metais pesados entram no ambiente por fontes naturais e antropogênicas. As atividades antropogênicas podem aumentar as concentrações dos metais em níveis muito mais elevados do que aqueles em que esses metais são encontrados originalmente na natureza (ANZECC; ARMCANZ, 2000). No solo, os metais são encontrados em diferentes formas - em solução, adsorvidos às argilas, precipitados e complexados a compostos orgânicos (ALLOWAY, 1995).

Algumas plantas são hiperacumuladoras de metais, podendo ser utilizadas na remediação de áreas contaminadas (JAFFRÉ *et al.*, 1976;



BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 1992). Alternativamente ao uso de plantas hiperacumuladoras, podem-se usar espécies com grande produção de matéria seca (MELO *et al.*, 2006).

Quando comparada a técnicas tradicionais como tratamento ou remoção física da camada contaminada de solo, a fitorremediação tem sido considerada vantajosa, principalmente por sua eficiência na descontaminação e pelo baixo custo (CUNNINGHAM *et al.*, 1996). No entanto, é necessário conhecer previamente as características físicas e químicas do solo e dos contaminantes, e a adaptação das plantas a essas condições (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000).

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi quantificar os metais pesados no solo e em sílico-fitólitos de plantas em áreas com elevadas concentrações desses elementos e avaliar o potencial dessas espécies para a fitorremediação de solos contaminados.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a concentração de metais pesados em sílico-ifitólitos de diferentes partes de plantas comuns e nativas de área contendo concentrações elevadas de metais pesados;
- Avaliar as relações entre as concentrações de metais pesados no solo e nos sílico-fitólitos;
- Avaliar o comportamento dos sílico-ifitólitos e a evolução quantitativa da concentração dos metais pesados no solo.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização da área de estudo**

#### **4.1.1 Localização**

A área de estudo está localizada a sudoeste da cidade de Riacho dos Machados e a nordeste da mineração Carpathian Gold (FIGURA 1). A área é limitada pelas coordenadas UTM 702600E – 702300E e 8230750N – 8230350N.

O acesso à área a partir de Montes Claros é feito pela Rodovia BR-251 (68 km), seguindo-se até o entroncamento com a Rodovia Estadual MG-120 (37 km), percorrendo-se uma distância de 105 km no total até a cidade de Riacho dos Machados. A partir desse ponto, o acesso é feito por estradas vicinais de terra até a sede da Fazenda Tião Amaral. A área abrangida neste estudo compreende aproximadamente 0,5 km<sup>2</sup>.

O local da coleta das amostras fica a Noroeste da mineração Carpathian Gold e nas faixas com alto teor de Zn, Pb e Cu entre outros (IBGE, 2014).

**Figura 1** - Localização e vias de acesso à cidade de Riacho dos Machados



Fonte: IBGE, 2015.

#### 4.1.2 Aspectos Fisiográficos

Do ponto de vista da paisagem natural, a área encontra-se inserida no domínio dos chapadões interiores, de acordo com a divisão morfoclimática proposta por Ab'Saber (1971) e, na classificação fitogeográfica, a região investigada está inserida no domínio das Savanas – Cerrados/Campos Gerais Tropicais (BAGGIO, 2008).

##### 4.1.2.1 Clima

Conforme a classificação de Köppen - Geiger (1918-1936), o clima da região é definido como BSh – quente, temperatura média anual entre 18,6 a 30,8 °C (NIMER, 1973). Junho é o mês mais seco com precipitação de 2 mm e o mês de maior precipitação é dezembro, com uma média de 207 mm. A média anual de pluviosidade é de 92 mm. A temperatura média chega a 22 °C (NIMER, 1979).

As variáveis climáticas apresentadas são importantes ambientalmente, pois estão diretamente correlacionadas com a mobilidade dos elementos (íons e complexos) nos solos/sedimentos e na água (BAGGIO, 2008).

#### **4.1.2.2 Hidrografia**

A área da pesquisa está integralmente inserida na bacia do Rio São Francisco e é marginado pela bacia do Rio Jequitinhonha.

A bacia hidrográfica do São Francisco está localizada nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, banhando sete Unidades da Federação (Minas Gerais, Bahia, Goiás, Distrito Federal, Pernambuco, Sergipe e Alagoas). A bacia confronta ao sul com a Bacia do Rio Grande, a oeste com as bacias dos rios Paranaíba, Tocantins e Araguaia, ao leste com as bacias dos rios Doce, Jequitinhonha, Pardo, de Contas, Paraguaçu e Itapecuru, e ao norte com as regiões hidrográficas do Atlântico Nordeste Ocidental e Paranaíba (IBAMA, 2006).

#### **4.1.2.3 Geologia**

A área em estudo pertence geológica e geograficamente à Serra do Espinhaço, que representa um importante acidente geográfico e estende-se desde as proximidades de Belo Horizonte até o limite norte do Estado da Bahia com o Estado do Piauí. Em Minas Gerais, a Serra do Espinhaço estende-se por cerca de 550 km, com direção aproximadamente N-S e largura variável de até 100 km. Ao norte de Diamantina ocorre a individualização da serra em duas direções, uma para o oeste e outra para leste.

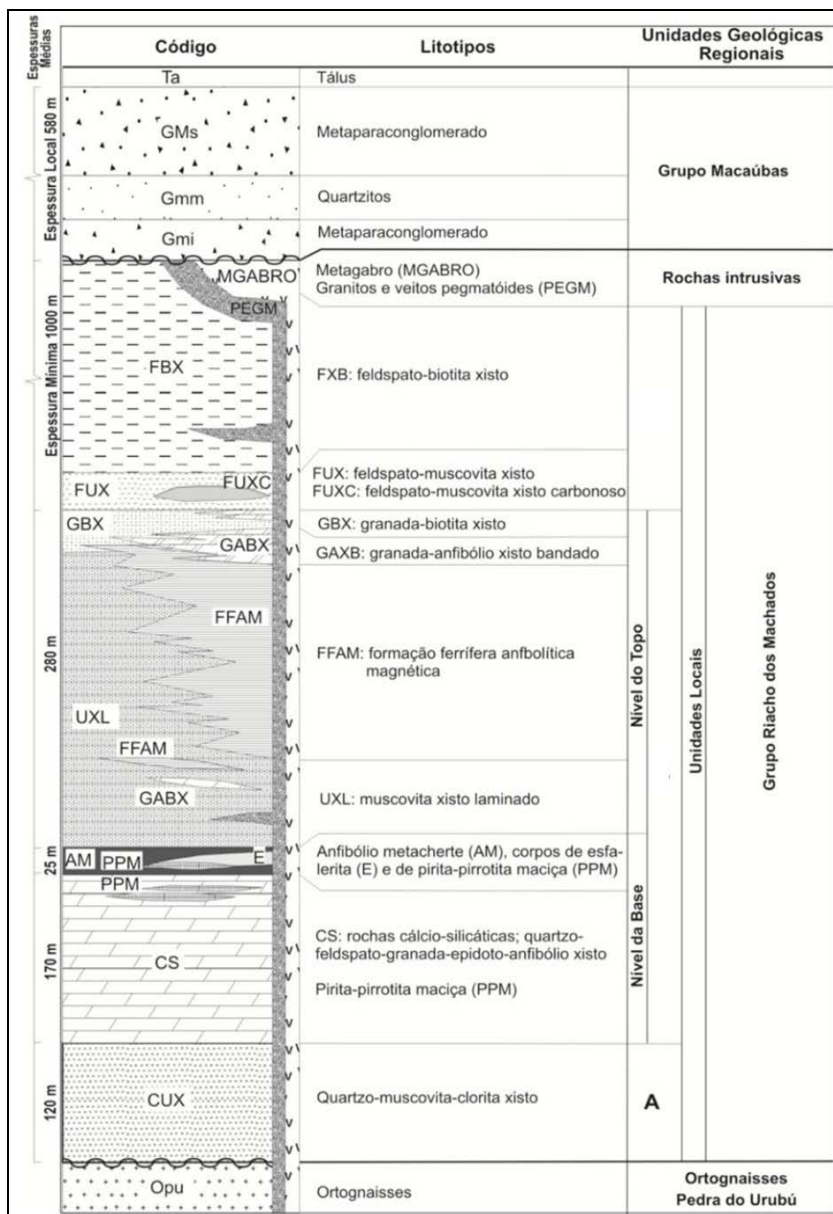
Nas Folhas Janaúba e Francisco Sá que abrangem a área em questão foram reconhecidos os conjuntos litoestratigráficos apresentados nas Figuras 2 e 3. Da base para o topo encontram-se as seguintes unidades:

- Complexo Córrego do Cedro: Formado por gnaisses bandados com intercalações de anfibolitos e veios e diques de rochas meta-ultramáficas;

- Suíte Rio Itacambiruçu: Principalmente granitóides foliados;
- Grupo Riacho dos Machados: Predominantemente mica-quartzo-xistos com intercalações de efusivas ácidas tectonizadas e corpos anfibolíticos e meta-ultramáficos;
- Suíte Catolé: formado por granitos levemente alcalino a sub-alcalino com faixas granodioritas;
- Grupo Macaúbas: Dominantemente metadiamicritos com intercalações de quartzitos grosseiras a finas e metassiltitos;
- Grupo Bambuí: Na região, pouco espessa, é formado principalmente por calcários e metassiltitos.

Essas unidades são cortadas por corpos de diabásio metamorfisados e intrusivos. Diques clásticos em fraturas das rochas do embasamento são frequentes como aluviões e colúvio em superfícies lateritizadas de aplainamento e vales, cobrindo todos os complexos (CROCCO *et al.*, 2006).

**Figura 2** - Coluna litoestratigráfica simplificada das rochas da região em estudo. As unidades mais ricas em metais são aquelas sulfetadas onde tem as ocorrências de Au



**Legenda:**

A letra "A" - na figura identifica a superfície das rochas investigadas.

Fonte: CROCCO *et al.*, 2006.

O mapa geológico (FIGURA 3) compilado de folhas do Projeto Espinhaço apresenta a distribuição e a compartimentação das diversas unidades aflorantes (FIGURAS 2 e 3).

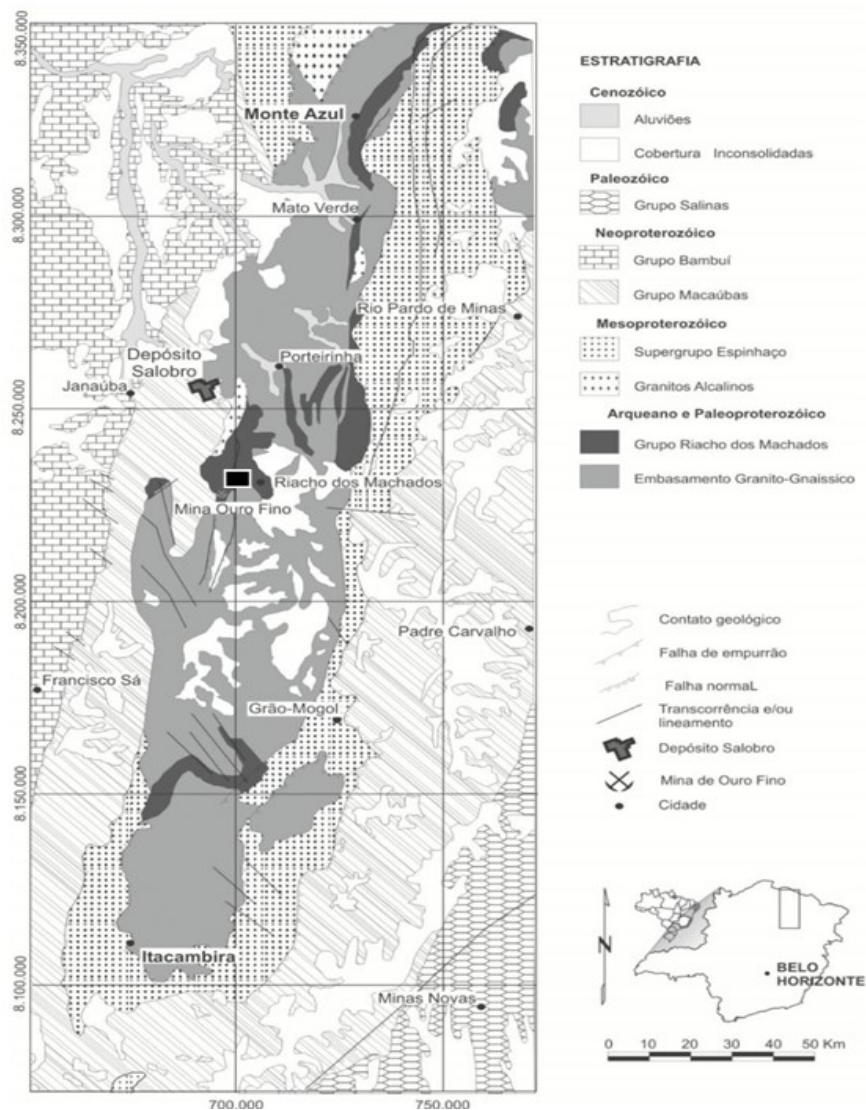
A porção ocidental da região é ocupada por metassedimentos do Grupo Bambuí (Proterozóico Superior), recobrando o Cráton do São Francisco e incipientemente deformados. A parte oriental insere-se no cinturão de cavalgamento Brasileiro (Faixa Araçuaí) e onde estão expostas rochas pertencentes ao Supergrupo Espinhaço, Grupo Macaúbas (Proterozóico Superior) e rochas cristalinas formadas até o final do Ciclo Transamazônico.

As rochas mais antigas da área pertencem ao Complexo Córrego do Cedro e são representadas por gnaisses bandados, localmente migmatizados, com intercalações métricas a decamétricas de anfibolito. Encaixada nesses gnaisses ocorre a sequência de xistos e anfibolitos pertencentes ao Grupo Riacho dos Machados e que aflora principalmente na porção sudeste a centro-leste.

Os granitóides s.l. ocorrem como corpos geralmente alongados segundo a direção N-S e (direção preferencial regional) e podem ser reunidos em três suítes denominadas Rio Itacambiruçu, Catolé e Paciência.

- Suíte Rio Itacambiruçu: Plutonito Barrocão (granodiorito e granito) em dois pequenos corpos na extremidade sul da folha;
- Suíte Catolé: Plutonitos Mulungu e Confisco (granito, quartzomonzonito e granodiorito). Ocorrem na porção centro-norte e no limite sul da folha;
- Suíte Paciência: dois plutonitos (Paciência e Quilombo) formados de sienogabro, monzodiorito, tonalito, monzonito e quartzomonzonito;
- Outras rochas intrusivas são representadas por soleiras e diques de metadiabásios.

**Figura 3** - Mapa geológico da região em questão com a localidade da investigação assinalada



Fonte: Adaptado de CROCCO *et al.*, 2006.

A evolução estrutural está documentada em Crocco-Rodrigues *et al.* (1993) e divide-se em quatro eventos deformativos principais, a seguir.

$D_n$ : responsável pelo desenvolvimento do bandamento gnáissico e migmatização nas rochas do Complexo Córrego do Cedro;

$D_{n+1}$ : é o principal evento de estruturação de grande parte do embasamento pré-Macaúbas. Subdividido em três fases, engloba



dobramentos de larga escala, falhas reversas de alto ângulo e transcorrências, que não afetam as coberturas do precambriano (grupos Macaúbas e Bambuí);

$D_{n+2}$ : Um evento extensional da abertura das bacias Macaúbas e/ou Espinhaço. Na área está documentado pelos diques clásticos em fraturas do embasamento;

$D_{n+3}$ : É um evento compressional causando vergência para oeste, é responsável pelo descolamento basal das coberturas, falhas reversas de alto ângulo e transcorrências de movimentação dextral desenvolvido por reativação de falhas  $D_{n+1}$  (Dobras de grande escala no Grupo Bambuí);

Segundo Siga Jr. (1986), pode-se considerar a idade dos eventos  $D_n$ ,  $D_{n+1}$  e  $D_{n+3}$  como respectivamente cerca de 2,76 Ga, 2,1 Ga e 0,6 Ga. O evento extensional ( $D_{n+2}$ ) ocorreu durante o Mesoproterozóico.

O metamorfismo da região caracteriza-se pelo desenvolvimento de faixas com bandamento variado, migmatitos (texturas "Schlieren", estruturas nebulíticas) e faixas mais tectonizadas com milonitos.

Um segundo evento, de caráter retrometamórfico, modificou as rochas mais máficas como anfíbolitos, com saussuritização e sericitização de feldspatos e cloritização e moscovitização da biotita, e nas rochas metaultramáficas com a formação de serpentina, talco, tremolita e clorita.

Nas zonas de cisalhamento os minerais dos gnaisses e granitóides são intensamente alterados e transformados em quartzo e moscovita, devido a processos hidrotermais de alteração. As paragêneses fundamentais nas rochas do Grupo Riacho dos Machados envolvem:

*a. biotita, moscovita, quartzo, plagioclásio e almandina;*

*b. biotita, moscovita, quartzo, estaurolita e cianita.*

Essas duas paragêneses correspondem à zona da cianita-estaurolita e da subfácies estaurolita-almandina, indicando fácies xisto verde alto de idade Transamazônico, sendo responsável pela alteração hidrotermal dos xistos do Grupo Riacho dos Machados (FONSECA, 1993) e pelas mineralizações de Pb, Cu, Cd e aurífera da Mina de Riacho dos Machados.

### 4.1.3 Morfologia da área

O relevo regional está compartimentado em duas grandes unidades:

- Planaltos do São Francisco;
- Depressão Sanfranciscana com suas variações morfológicas, que se deram em função da litologia, morfologia, posição topográfica e do grau do retrabalhamento erosivo durante a sua história evolutiva.

O município possui em seu relevo o ponto mais alto na Serra Gado Bravo com 1.130 metros, e seu ponto mais baixo está localizado na foz do Rio Peixe Bravo a 714 m de altitude. Aproximadamente 40% do território são planos, outros 40% ondulados e 20% montanhosos. Localiza-se na Bacia do Rio São Francisco e na Bacia do Rio Jequitinhonha. A altitude média da região é da ordem de 780 m, variando desde 486 m, onde o Rio Gurutuba abandona a mesma (ao norte) até 1.252 m, em um pico posicionado na porção meridional da Serra do Coco. (BAGGIO, H. F, 2002).

As terras altas ocupam 3/8 da superfície da SE-23-X-B-1 Francisco Sá 1: 100.000, com altitude média próxima de 900 m; o restante tem altitude média ao redor de 525 m. Essa zona rebaixada é acentuadamente plana. Salientam-se na topografia duas linhas de serras. (BAGGIO, H. F, 2002).

A paisagem é gerada pelo entalhamento das rochas predominantemente quartzíticas, com a formação de elevações e espigões de formas diversas. O quadro final é dado pelo contraste entre os rochedos e as superfícies mais baixas, que geralmente são cobertas por vegetação rasteira. Essas superfícies constituem extensos pediplanos onde existem intercalações de litologias mais susceptíveis à decomposição. (GUIMARÃES, *et al.*, 1997).

### 4.1.4 Solos

Os solos predominantes na região pertencem às ordens Argissolo e Cambissolo, cujas fases de relevo majoritárias são: ondulado e forte ondulado. Os Cambissolos possuem horizonte B incipiente e podem variar de perfeitamente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor

bruna ou bruno-amarelada até vermelho escuro e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração argila. Por outro lado, os Argissolos possuem horizonte B textural e argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico e horizonte B textural imediatamente abaixo de horizonte A ou E. São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas, e, mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este (EMBRAPA, 2004; EMBRAPA, 2006).

Na tabela 1 são apresentados os valores obtidos nas análises químicas e físicas das amostras coletadas na área de estudo. As análises foram feitas no Laboratório de Solos do ICA/UFMG. A primeira amostragem de solos foi efetuada no momento em que se coletou as amostras de plantas (período chuvoso). A segunda amostragem foi efetuada no período de baixa precipitação. O parâmetro “umidade do solo” foi significativo apenas para as plantas.

Na tabela 2 são apresentadas as concentrações totais, mínimas e máximas disponíveis, em  $\text{mg kg}^{-1}$ , dos elementos encontrados nas amostras de solos.

**Tabela 1 - Resultados das análises físicas e químicas das amostras coletadas**

| RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS AMOSTRAS COLETADAS |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1a Amostragem                                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| AMOSTRAS DE SOLOS - identificação              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| ATRIBUTOS DOS SOLOS                            | 001   | Nível | 002   | Nível | 003   | Nível | 004   | Nível | 005   | Nível | 006   | Nível | 007   | Nível | 008   | Nível |
| pH em água                                     | 5,8   | Bx    | 6,9   | A     | 6     | B     | 5,4   | Bx    | 5     | B     | 6     | A     | 6,4   | A     | 5,8   | B     |
| P-Mehlich (mg dm <sup>-3</sup> )               | 1,6   | MBx   | 18,32 | M     | 1,85  | MBx   | 1,6   | MBx   | 2,19  | MBx   | 3,51  | M     | 4,01  | MBx   | 1,79  | MBx   |
| P remanescente (mg L <sup>-1</sup> )           | 37,55 |       | 42,34 |       | 36,21 |       | 37,55 |       | 31,74 |       | 36,21 |       | 37,55 |       | 44,3  |       |
| k (mg dm <sup>-3</sup> )                       | 193   | MB    | 304   | MB    | 172   | MBx   | 193   | MB    | 203   | MBx   | 162   | MB    | 243   | MB    | 152   | MBx   |
| Ca (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 3,8   | B     | 10,2  | MD    | 4,8   | MB    | 3,8   | B     | 7,9   | MB    | 3,1   | MB    | 5,44  | MB    | 3,5   | B     |
| Mg (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 3     | MB    | 2     | MB    | 2,4   | MB    | 3     | MB    | 5,1   | MB    | 3,8   | MB    | 2,76  | MB    | 2,34  | MB    |
| Al (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0,1   | MBx   | 0     | MBx   |
| H+Al (cmol dm <sup>-3</sup> )                  | 2,86  | M     | 1,33  | Bx    | 2,08  | Bx    | 2,86  | M     | 2,53  | M     | 2,22  | Bx    | 1,86  | Bx    | 2,08  | Bx    |
| SB (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 7,29  | MB    | 12,98 | MB    | 7,64  | MB    | 7,28  | MB    | 13,52 | MB    | 13,32 | MB    | 8,82  | MB    | 6,23  | MB    |
| t (cmolc dm <sup>-3</sup> )                    | 7,29  | B     | 12,98 | MB    | 7,64  | B     | 7,23  | B     | 13,52 | MB    | 13,32 | MB    | 8,92  | MB    | 6,23  | B     |
| m (%)  | 0     | B     | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 1     | MBx   | 0     | MBx   |
| T (cmolc dm <sup>-3</sup> )                    | 10,16 | B     | 14,31 | B     | 3,74  | B     | 10,16 | B     | 16,11 | MB    | 15,53 | MB    | 10,68 | B     | 8,31  | M     |
| V (%)  | 12    | B     | 91    | MB    | 3,74  | B     | 72    | B     | 84    | MB    | 86    | MB    | 83    | MB    | 75    | B     |
| Materia Orgânica (dag kg <sup>-1</sup> )       | 5,58  |       | 8,88  | MB    | 5,58  | B     | 5,58  | B     | 7,37  | MB    | 5,38  | B     | 6,9   | B     | 6,9   | B     |
| Carbono Orgânico (dag kg <sup>-1</sup> )       | 3,25  |       | 5,15  | MB    | 3,24  | B     | 3,24  | B     | 4,27  | MB    | 3,12  | B     | 4     | B     | 4     | B     |
| Areia grossa (dag kg <sup>-1</sup> )           | 23,2  |       | 12,9  |       | 29,3  |       | 23,2  |       | 18,3  |       | 15,1  |       | 24,8  |       | 19    |       |
| Areia fina (dag kg <sup>-1</sup> )             | 34,8  |       | 49,1  |       | 30,7  |       | 34,8  |       | 37,7  |       | 34,9  |       | 35,2  |       | 43    |       |
| Silte (dag kg <sup>-1</sup> )                  | 18    |       | 28    |       | 26    |       | 18    |       | 28    |       | 36    |       | 32    |       | 24    |       |
| Argila (dag kg <sup>-1</sup> )                 | 24    | Tme   | 10    | Ar    | 14    | Tme   | 24    | Tme   | 16    | Tme   | 14    | Ar    | 18    | Tme   | 14    | Tme   |
| 2a Amostragem                                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| AMOSTRAS DE SOLOS - identificação              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| ATRIBUTOS DOS SOLOS                            | H1    | Nível | H2    | Nível | H3    | Nível | H4    | Nível | H5    | Nível | H6    | Nível | H7    | Nível | H8    | Nível |
| pH em água                                     | 5,9   | B     | 6,3   | A     | 6     | B     | 5,7   | B     | 6,5   | A     | 5,3   | B     | 6     | B     | 5,5   | B     |
| P-Mehlich (mg dm <sup>-3</sup> )               | 2,19  | MBx   | 1,99  | MBx   | 1,79  | MBx   | 0,97  | MBx   | 2,71  | MBx   | 2,19  |       | 1,85  | MBx   | 3,16  | MBx   |
| P remanescente (mg L <sup>-1</sup> )           | 31,74 |       | 32,75 |       | 34,98 |       | 24,66 |       | 29,03 |       | 31,74 |       | 36,21 |       | 37,55 |       |
| k (mg dm <sup>-3</sup> )                       | 203   | MBx   | 436   | MBx   | 152   | MB    | 101   | B     | 264   | MB    | 203   | MBx   | 172   | MB    | 213   | MB    |
| Ca (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 7,9   | MB    | 9     | MB    | 7,2   | MB    | 9     | MB    | 9,4   | MB    | 7,9   | MB    | 4,8   | MB    | 4     | B     |
| Mg (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 5,1   | MB    | 3     | MB    | 1,8   | MB    | 6     | MB    | 4,6   | MB    | 5,1   | MB    | 2,4   | MB    | 2     | MB    |
| Al (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   |
| H+Al (cmol dm <sup>-3</sup> )                  | 2,59  | M     | 1,66  | Bx    | 2,32  | Bx    | 2,32  | MB    | 1,49  | Bx    | 2,59  | M     | 2,08  | Bx    | 3,62  | M     |
| SB (cmol dm <sup>-3</sup> )                    | 13,52 | MB    | 13,12 | MB    | 9,39  | MB    | 15,26 | MB    | 14,68 | MB    | 13,52 | MB    | 7,61  | MB    | 6,55  | MB    |
| t (cmolc dm <sup>-3</sup> )                    | 13,52 | MB    | 13,12 | MB    | 9,39  | MB    | 15,26 | MBx   | 14,68 | MB    | 13,52 | MB    | 7,64  | B     | 6,55  | B     |
| m (%)  | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MB    | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   | 0     | MBx   |
| T (cmolc dm <sup>-3</sup> )                    | 16,11 | MB    | 14,78 | B     | 11,71 | B     | 17,58 | MB    | 16,16 |       | 16,11 | MB    | 3,72  | B     | 10,16 | MB    |
| V (%)  | 84    | MB    | 89    | MB    | 80    | MB    | 87    | B     | 91    | MB    | 84    | MB    | 79    | B     | 64    | MB    |
| Materia Orgânica (dag kg <sup>-1</sup> )       | 7,37  | MB    | 7,61  | MB    | 5,58  | B     | 4,41  | B     | 7,61  | MB    | 7,37  | MB    | 5,58  | B     | 10,53 |       |
| Carbono Orgânico (dag kg <sup>-1</sup> )       | 4,27  | MB    | 4,41  | MB    | 3,24  | B     | 2,56  |       | 4,41  | MB    | 4,27  | MB    | 3,24  | B     | 6,11  |       |
| Areia grossa (dag kg <sup>-1</sup> )           | 18,3  |       | 11,9  |       | 17,7  |       | 6     |       | 3,5   |       | 18,3  |       | 29,3  |       | 29,3  |       |
| Areia fina (dag kg <sup>-1</sup> )             | 37,7  |       | 40,1  |       | 30,3  |       | 28    |       | 48,5  |       | 37,7  |       | 30,7  |       | 30,7  |       |
| Silte (dag kg <sup>-1</sup> )                  | 28    |       | 34    |       | 34    |       | 46    |       | 32    |       | 28    |       | 26    |       | 22    |       |
| Argila (dag kg <sup>-1</sup> )                 | 16    | Tme   | 14    | Ar    | 18    | Tme   | 20    | Tme   | 10    | Tme   | 16    | Tme   | 14    | Tme   | 18    | Tme   |

**Legenda:** MBx=muito baixo; Bx= Baixo; B= Bom; M= médio; A= alto; MB= muito bom; MA= muito alto; Ar= arenoso; Tme= textura média; Arg= argiloso; Marg= muito argiloso.

Fonte: ICA/ UFMG Instituto de Ciências Agrárias/ Universidade Federal de Minas Gerais - Laboratório de Análises de Solos

Fonte: Da autora, 2016.

**Tabela 2** - Concentrações totais, mínimas e máximas disponíveis em mg kg<sup>-1</sup> dos elementos no solo

| Amostra  |   | Mg    | Al     | Fe     | Ba   | Cr    | Co   | Cu   | Cd   | Ni   | Pb   | Ti   | Mn   | Zn   |
|----------|---|-------|--------|--------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>1</b> | A | nd    | 29,09  | 30,65  | nd   | 0,43  | nd   | 0,03 | nd   | 0,21 | nd   | 1,78 | 0,48 | 0,06 |
|          | B | 3,06  | 18,51  | 16,93  | 0,16 | 0,12  | 0,02 | 0,29 | 0,04 | 0,25 | 0,11 | 0,19 | 0,92 | 0,07 |
|          | C | 10,68 | 60,45  | 55,51  | 0,59 | 0,56  | 0,09 | 0,44 | 0,04 | 0,54 | 0,24 | 0,90 | 3,66 | 0,27 |
|          | D | 20,47 | 108,98 | 114,27 | 1,02 | 2,16  | 0,43 | 0,72 | 0,05 | 2,90 | 0,32 | 1,53 | 9,20 | 0,79 |
| <b>2</b> | A | nd    | 30,91  | 13,66  | nd   | 0,03  | nd   | 0,02 | nd   | nd   | nd   | 1,68 | 0,42 | 0,03 |
|          | B | 0,74  | 0,25   | 0,23   | 0,10 | 0,00  | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,13 | 0,06 | 0,01 | 0,37 | 0,04 |
|          | C | 21,32 | 70,55  | 122,40 | 1,17 | 0,48  | 0,12 | 0,29 | 0,01 | 0,24 | 0,31 | 1,81 | 6,57 | 0,48 |
|          | D | 23,76 | 97,10  | 120,15 | 1,34 | 0,49  | 0,13 | 0,17 | 0,01 | 0,18 | 0,31 | 2,62 | 7,37 | 0,57 |
| <b>3</b> | A | nd    | 30,55  | 15,52  | nd   | nd    | nd   | 0,02 | nd   | nd   | nd   | 1,74 | 0,36 | 0,02 |
|          | B | 1,22  | 0,85   | 1,35   | 0,16 | 0,03  | 0,02 | 0,25 | 0,04 | 0,24 | 0,09 | 0,01 | 1,82 | 0,04 |
|          | C | 10,90 | 62,02  | 90,70  | 0,52 | 0,80  | 0,16 | 0,50 | 0,05 | 0,79 | 0,25 | 0,94 | 5,08 | 0,35 |
|          | D | 14,71 | 96,61  | 113,74 | 0,72 | 1,10  | 0,18 | 0,54 | 0,04 | 0,78 | 0,35 | 1,42 | 6,58 | 0,43 |
| <b>4</b> | A | nd    | 34,58  | 15,94  | nd   | 0,09  | nd   | 0,03 | nd   | 0,05 | nd   | 1,53 | 0,00 | 0,03 |
|          | B | 0,79  | 0,30   | 0,17   | 0,10 | 0,00  | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,13 | 0,06 | 0,01 | 0,62 | 0,03 |
|          | C | 24,05 | 128,80 | 122,40 | 0,66 | 1,23  | 0,24 | 0,47 | 0,01 | 0,63 | 0,40 | 3,17 | 6,46 | 0,57 |
|          | D | 24,92 | 121,65 | 122,40 | 0,74 | 0,95  | 0,28 | 0,45 | 0,01 | 0,62 | 0,41 | 3,93 | 7,43 | 0,64 |
| <b>5</b> | A | nd    | 31,67  | 19,33  | nd   | 0,15  | nd   | 0,03 | nd   | 0,05 | nd   | 1,87 | 0,42 | 0,04 |
|          | B | 0,81  | 2,37   | 2,81   | 0,14 | 0,00  | 0,01 | 0,11 | 0,01 | 0,21 | 0,06 | 0,15 | 0,57 | 0,05 |
|          | C | 21,71 | 138,65 | 119,40 | 1,47 | 2,13  | 0,25 | 0,69 | 0,02 | 0,98 | 0,46 | 3,00 | 7,91 | 0,64 |
|          | D | 18,91 | 92,39  | 103,60 | 1,31 | 1,26  | 0,24 | 0,50 | 0,03 | 0,71 | 0,38 | 1,94 | 6,91 | 0,53 |
| <b>6</b> | A | 0,00  | 30,77  | 19,95  | 0,00 | 0,04  | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 3,75 | 0,82 | 0,07 |
|          | B | 1,74  | 0,46   | 0,84   | 0,36 | 0,00  | 0,05 | 0,11 | 0,00 | 0,21 | 0,08 | 0,01 | 2,67 | 0,09 |
|          | C | 23,14 | 129,30 | 122,70 | 1,56 | 0,80  | 0,27 | 0,39 | 0,02 | 0,43 | 0,66 | 6,91 | 8,11 | 1,38 |
|          | D | 23,15 | 117,55 | 122,70 | 1,66 | 0,42  | 0,28 | 0,33 | 0,01 | 0,36 | 0,59 | 5,40 | 8,74 | 1,23 |
| <b>7</b> | A | nd    | 35,17  | 15,75  | nd   | 0,098 | nd   | 0,02 | nd   | 0,04 | nd   | 1,42 | 0,31 | 0,07 |
|          | B | 1,65  | 0,49   | 1,60   | 0,20 | 0,00  | 0,09 | 0,06 | 0,01 | 0,13 | 0,07 | 0,01 | 2,39 | 0,16 |
|          | C | 7,15  | 81,40  | 122,40 | 0,88 | 1,28  | 0,33 | 0,52 | 0,01 | 0,66 | 0,50 | 1,30 | 5,64 | 1,33 |
|          | D | 8,46  | 89,95  | 122,40 | 1,03 | 0,81  | 0,37 | 0,47 | 0,01 | 0,67 | 0,52 | 1,27 | 6,46 | 1,43 |
| <b>8</b> | A | nd    | 26,79  | 10,21  | nd   | nd    | nd   | 0,02 | nd   | nd   | nd   | 0,91 | 0,13 | 0,01 |
|          | B | 2,41  | 3,22   | 1,15   | 0,38 | 0,00  | 0,05 | 0,13 | 0,01 | 0,21 | 0,09 | 0,01 | 1,38 | 0,06 |
|          | C | 22,00 | 58,10  | 121,30 | 0,48 | 0,24  | 0,13 | 0,26 | 0,02 | 0,21 | 0,17 | 1,12 | 1,76 | 0,19 |
|          | D | 23,14 | 73,43  | 116,80 | 0,54 | 0,22  | 0,13 | 0,26 | 0,01 | 0,23 | 0,18 | 1,51 | 2,22 | 0,23 |
| <b>9</b> | A | nd    | 34,28  | 3,56   | nd   | nd    | nd   | 0,02 | nd   | nd   | nd   | 0,42 | 0,06 | 0,01 |
|          | B | 4,13  | 22,92  | 18,64  | 0,23 | 0,79  | 0,07 | 0,36 | 0,04 | 0,92 | 0,10 | 0,38 | 1,84 | 0,15 |
|          | C | 7,55  | 44,14  | 41,74  | 0,37 | 0,18  | 0,02 | 0,36 | 0,04 | 0,26 | 0,23 | 0,26 | 1,55 | 0,15 |
|          | D | 6,91  | 46,11  | 22,51  | 0,34 | 0,08  | 0,01 | 0,32 | 0,03 | 0,24 | 0,19 | 0,17 | 0,69 | 0,09 |

Legenda:

A = Análises FRX %, B = Água deionizada, C = Ácido fraco (10%) HNO<sub>3</sub>, D = Ácido Forte HNO<sub>3</sub> conc., nd = não detectado.

Fonte: Da autora, 2016.

#### 4.1.5 Uso da Terra

A agricultura é a principal atividade econômica do município de Riacho dos Machados, superada apenas pela atividade de extração de minério (ouro) representada pela empresa Carpathian Gold.

São produzidos grãos de feijão (706 ha), amendoim (5 ha), arroz (12 ha) e abacaxi (2 ha). Dentre as culturas perenes, a citricultura é a que ocupa maior área (13 ha), seguida da cafeicultura com uma área de 5 ha. A agricultura é basicamente de subsistência, pouco mecanizada e quase sempre se enquadra no modelo de agricultura familiar. A pecuária também é de subsistência. Os rebanhos com maior número de animais é o bovino seguido do avícola. Outra atividade de destaque é a silvicultura. O município produz em média 141.100 m<sup>3</sup> de lenha de eucalipto, 140 ton. de carvão vegetal e mais 100 m<sup>3</sup> de madeira utilizados para diversos fins (IBGE, 2014).

#### **4.1.6 Vegetação**

A vegetação regional remanescente é típica do cerrado e da caatinga (arbustiva, e arbórea). Algumas espécies comuns dessa vegetação são a aroeira (*Myracrodruon urundeuva*), a braúna (*Schinopsis brasiliensis*), a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis Tul.*), o umbuzeiro (*Spondias tuberosa L.*), a barriguda (*Ceiba glaziovii*), bromeliáceas como a macambira (*Bromelia laciniosa*) e diversas espécies de cactáceas. Atualmente há grandes áreas ocupadas por pastagem e também porções significativas de áreas em diversos estágios de degradação, nas quais os solos estão expostos e, portanto, sujeitos às ações das intempéries.

No entorno da área de estudo, a vegetação natural e predominante é representada pelas fitofisionomias de Cerrado e Floresta Estacional Decidual e pode ser caracterizada como uma região ecótona, ou seja, é uma área de transição ambiental onde podem ocorrer mudanças bruscas na vegetação em diferentes gradientes ecológicos. O cerrado representa o principal tipo de vegetação. (LIMA I. L. P *et al.*, 2012).

### **4.2 Amostras de plantas e solos**

#### **4.2.1 Localização dos Pontos de Amostragem das Plantas**

A localização dos pontos de amostragem das plantas foi determinada por uso de dados georreferenciados obtidos com GPS e altímetro. O

equipamento utilizado registrou um erro de 1-3 m entre o ponto georreferenciado e o valor indicado pelo aparelho. Os dados obtidos encontram-se nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3** - Indicação dos locais da amostragem e identificação de campo referente aos locais de coleta

| <b>1ª AMOSTRAGEM</b>          |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Espécie</b>                | <b>Localização geográfica</b> | <b>Identificação em campo</b> |
| <i>Sida sp</i>                | 0702921/8230736               | H5.1                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0703047/8230482               | H9.2                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702721/8230578               | H9.1                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702702/8230601               | H7.1                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0703210/8230468               | H8.1                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702991/8230068               | H6.2                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0703210/8230468               | H7.1                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0703148/8230459               | H8.1                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702991/8230685               | H6.3                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702674/8230621               | H6.1                          |
| <b>2ª AMOSTRAGEM</b>          |                               |                               |
| <b>Espécie</b>                | <b>Localização geográfica</b> | <b>Identificação em campo</b> |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702721/8230578               | 002A                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702721/8230578               | 002B                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702702/8230601               | 003A                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702702/8230601               | 003B                          |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i> | 0702702/8230601               | 003C                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702674/8230621               | 004A                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702674/8230621               | 004B                          |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i> | 0702674/8230621               | 004C                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702628/8230672               | 005A                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702628/8230672               | 005B                          |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i> | 0702628/8230672               | 005C                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702877/8230662               | 006A                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702877/8230662               | 006B                          |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i> | 0702877/8230662               | 006C                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0702927/8230670               | 007A                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0702927/8230670               | 007B                          |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i> | 0702927/8230670               | 007C                          |
| <i>Rollinia leptopetala</i>   | 0703086/8230416               | 007A                          |
| <i>Sida sp</i>                | 0703086/8230416               | 007B                          |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i> | 0703086/8230416               | 007C                          |

Fonte: Da autora, 2016.



**Tabela 4** - Órgãos das plantas investigadas e a sua localização exata em torno dos pontos de referência de 1 a 9

| Am    | Espécie                       | Órgão da planta | L1      | L2      |
|-------|-------------------------------|-----------------|---------|---------|
| 007A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0703086 | 8230416 |
| H9.2  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0703047 | 8230482 |
| H6.2  | <i>Sida sp.</i>               | folha           | 0702991 | 8230685 |
| 003A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702702 | 8230601 |
| 002B  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702721 | 8230578 |
| 004B  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702674 | 8230621 |
| H9.2  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | raiz            | 0703047 | 8230482 |
| 005C  | <i>Piptadenia gonoacantha</i> | folha           | 0702628 | 8230672 |
| 003A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | caule           | 0702702 | 8230601 |
| H7.1  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | raiz            | 0703210 | 8230468 |
| H8.1  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | caule           | 0703148 | 8230459 |
| H7.1  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | raiz            | 0703210 | 8230468 |
| 002B  | <i>Sida sp.</i>               | caule           | 0702721 | 8230578 |
| 006B  | <i>Sida sp.</i>               | raiz            | 0702877 | 8230662 |
| 007B  | <i>Sida sp.</i>               | caule           | 0702927 | 8230670 |
| 004C  | <i>Piptadenia gonoacantha</i> | folha           | 0702674 | 8230621 |
| 006A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | caule           | 0702877 | 8230662 |
| 002C  | <i>Piptadenia gonoacantha</i> | folha           | 0702702 | 8230601 |
| 007B  | <i>Sida sp.</i>               | caule           | 0703086 | 8230416 |
| 004A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | caule           | 0702674 | 8230621 |
| 007B  | <i>Sida sp.</i>               | raiz            | 0703086 | 8230416 |
| 007A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | raiz            | 0703086 | 8230416 |
| 002 A | <i>Rollinia leptopetala</i>   | raiz            | 0702721 | 8230578 |
| 002 A | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702721 | 8230578 |
| 005B  | <i>Sida sp.</i>               | caule           | 0702628 | 8230672 |
| 005A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702628 | 8230672 |
| 008A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0703086 | 8230416 |
| 005C  | <i>Piptadenia gonoacantha</i> | c               | 0702628 | 8230672 |
| 007C  | <i>Piptadenia gonoacantha</i> | raiz            | 0703086 | 8230416 |
| 004C  | <i>Piptadenia gonoacantha</i> | caule           | 0702674 | 8230621 |
| 008A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | caule           | 0703086 | 8230416 |
| 003A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | raiz            | 0702702 | 8230601 |
| 006B  | <i>Sida sp.</i>               | folha           | 0702877 | 8230662 |
| 005B  | <i>Sida sp.</i>               | caule           | 0702628 | 8230672 |
| 003A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | caule           | 0702702 | 8230601 |
| 005B  | <i>Sida sp.</i>               | folha           | 0702628 | 8230672 |
| 006B  | <i>Sida sp.</i>               | raiz            | 0702877 | 8230662 |
| 004A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702674 | 8230621 |
| 005B  | <i>Sida sp.</i>               | raiz            | 0702877 | 8230662 |
| 007C  | <i>Piptadenia gonoacantha</i> | folha           | 0703086 | 8230416 |
| 005A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702628 | 8230672 |
| 005B  | <i>Sida sp.</i>               | folha           | 0702628 | 8230672 |
| 006B  | <i>Sida sp.</i>               | raiz            | 0702628 | 8230672 |
| 006B  | <i>Sida sp.</i>               | raiz            | 0702628 | 8230672 |
| 006B  | <i>Sida sp.</i>               | raiz            | 0702628 | 8230672 |
| 008A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702628 | 8230672 |
| 008A  | <i>Rollinia leptopetala</i>   | folha           | 0702628 | 8230672 |

Fonte: Da autora, 2016.

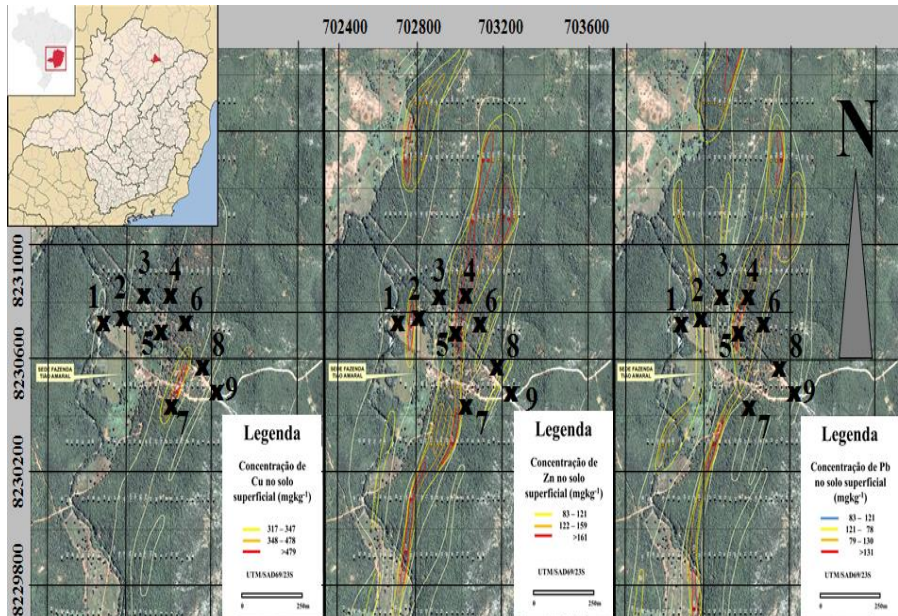


#### **4.2.2 Localização das Amostragens de Solos**

As amostras coletadas foram georeferenciadas e indicadas em mapa (FIGURA 4). Amostrou-se no total 9 pontos com duas amostragens nas profundidades de 3 a 10 cm. A localização e a identificação das amostras estão apresentadas na Tabela 5.

Os solos da área se formaram principalmente por argilite, arenito e também, em pequena quantidade, de gnaisses graníticos do embasamento e veios quartzíticos. Eles são compostos por argila, areia quartzítica, cascalho de quartzo (onde veios de quartzo foram intemperizados) e muito pouca contribuição orgânica. O Horizonte A desses solos tem profundidade de até 30 cm. Atualmente, esses solos estão muito descaracterizados devido ao uso intenso pela agricultura de subsistência e erosão, sendo que a camada correspondente a serrapilheira praticamente inexistente.

**Figura 4 - Mapas com isolinhas da concentração dos metais pesados selecionados**



Legenda:

- Mapa com isolinhas de Cu;
- Mapa com isolinha de Zn;
- Mapa com isolinhas de Pb.

Fonte: MINERAÇÃO CARPATHIAN GOLD; GOOGLE MAPS, 2015.

Estas isolinhas são resultados de uma pesquisa mineral da empresa Carpathian Gold. Os pontos da amostragem estão indicados em números pretos do mapa à esquerda. A amostragem foi realizada em três perfis distintos sempre cortando áreas com concentrações anômalas

**Tabela 5** - Localização e identificação das amostras coletadas no campo

| <b>LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS AMOSTRAS DE SOLO</b> |                               |                               |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>1ª AMOSTRAGEM</b>                               |                               |                               |
| <b>Amostra solo</b>                                | <b>Localização geográfica</b> | <b>Identificação em campo</b> |
| 1  | 23L072843,677/8230516,793     | 001                           |
| 2  | 23L0702718,812/8230579,223    | 002                           |
| 3  | 23L0702702,170/8230601,184    | 003                           |
| 4  | 23L0702674,131/8230621,097    | 004                           |
| 5  | 23L0702627,576/8230671,996    | 005                           |
| 6  | 23L0702876,970/8230661,763    | 006                           |
| 7  | 23L0702927,631/8230669,492    | 007                           |
| 8  | 23L0703085,969/8230415,813    | 008                           |
| 9  | 23L0703010,6689/8230435,465   | 009                           |
| <b>2ª AMOSTRAGEM</b>                               |                               |                               |
| 10   | 23L0702743,060/8230665,136    | H1                            |
| 11   | 23L0702801,120/8230643,985    | H2                            |
| 12   | 23L0702757,895/8230678,183    | H3                            |
| 13   | 23L0702820,303/8230604,495    | H4                            |
| 14   | 23L0702878,976/8230689,779    | H5                            |
| 15   | 23L0702652,866/8230640,291    | H6                            |
| 16   | 23L0703164,375/8230416,822    | H7                            |
| 17   | 23L0703108,175/8230414,673    | H8                            |
| 18   | 23L0703010,972/8230434,448    | H9                            |

Fonte: Da autora, 2015.

Tanto as amostras de material vegetal quanto as amostras de solos foram coletadas em duas subáreas denominadas de área com teores mais elevados e área com teores menos elevados de metais pesados. Essas áreas foram assim definidas com base nos resultados das análises químicas feitas pela empresa de Mineração Carpathian Gold (FIGURA 4).

A área com teores mais elevados é aquela na qual os teores de Cu e Pb no solo ultrapassaram os níveis de prevenção de 60 e 72 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420 de 2009 (CONAMA, 2009), enquanto, naquela com baixos teores os dois elementos citados estão abaixo dos níveis considerados.

#### **4.2.3 Caracterização das Plantas Amostradas**

A Tabela 6 e a Figura 5 mostram a identificação taxonômica, características morfológicas, formas de disseminação, categorias sucessionais, habitat, importância econômica e imagens das espécies identificadas para o estudo. A elaboração da tabela teve como objetivo prestar informações fundamentais sobre as espécies selecionadas para os trabalhos de fitorremediação.










As informações apresentadas foram extraídas de amplo referencial bibliográfico que trata de temas como taxonomia vegetal, dendrologia, fitossociologia, ecologia, ecofisiologia vegetal etc. A documentação fotográfica apresentada na Figura 5 foi obtida durante as campanhas de campo.

**Tabela 6** – Principais características das espécies identificadas na área estudada: *Rollinia leptopetala* Refr., *Piptadenia gonoacantha* e *Sida* sp.

| NOMENCLATURA |                                   |  | CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS                |                     |           |                         | ÉPOCA DE             |                      | REPRODUÇÃO/<br>DISSEMINAÇÃO | ECOLOGIA  | DISTRIBUIÇÃO<br>GEOGRÁFICA                | HABITAT   | CATEGORIAS<br>ECOFISIOLÓGICAS | IMPORTÂNCIA<br>ECONÔMICA  | PRINCIPAIS<br>CARACTERÍSTICAS   |
|--------------|-----------------------------------|--|---|---------------------|-----------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|---|---|---|-------------------------------|---------------------------|---|
| Família      | Nome Científico                   | Nome Vulgar                              | Folhas                                      | Flores              | Frutos    | Porte                   | Floração             | Frutificação         |                             |   |   |   |                               |                           |   |
| Annonaceae   | <i>Rollinia leptopetala</i> Refr. | Ata-de-urubu, Banana-de-urubu, Bananinha | Lanceoladas, alternas e disticas            | Brácteas            | Aporcápio | Arbustivo<br>(3-8 m)    | Novembro             | Março                | Sementes, vegetativa        | Árvore ou arbusto<br>(2-9 m)  | Ocorre nos Estados do PI, CE, PE, BA e MG | Cerrado   | Secundária Inicial            | Alimentício, melífera     | Espécie perene, zoocoria. É a única espécie do gênero que possui a corola vinosa a avermelhada e fruto apocárpico (Maas et al. 1992). |
| Fabaceae     | <i>Piptadenia gonoacantha</i>     | Pau-jacaré, icarapé, jacaré, caniveteiro | Pinadas                                     | Rácemos             | Legume    | Arbóreo<br>(6-8m)       | Novembro a Abril     | Abril a Agosto       | Sementes, vegetativa        | Árvore de 8 – 20m e 20-50 cm de DAP, pode atingir até 30 m de altura e 90 cm de DAP | Ocorre nos Estados do RJ, MG, MS, SC      | Florestas estacionais semidecíduais                             | Secundária Inicial            | Madeira e melífera        | Espécie rústica rápido crescimento que cresce em áreas de vegetação inicial, comportando-se como secundária inicial                   |
| Malvaceae    | <i>Sida</i> sp                    | Guaxuma, vassoura                        | Simplex, inteiras, alternas e com estipulas | Axilares, terminais |           | Subarbustos sublenhosos | Durante todo o verão | Durante todo o verão | Sementes                    | Subarbusto perene   | Américas, África e Austrália              | Cerrado, florestas estacionais semidecíduais áreas antropizadas | Pioneira                      | Planta daninha infestante | Infestante, devido à alta agressividade, e com pouco ou nenhum valor comercial  |

Fonte: Adaptado de: MAGALHÃES, 1966; VELOSO *et al.*, 1991; DUBOC, 2004; LORENZI, 2008.

**Figura 5** - Imagens das espécies identificadas e selecionadas na área estudada

| <b>Documentação fotográfica das Espécies Selecionadas</b>                           |   |  |
|---|---|--|
| <i>Annona leptoptela</i> - Bananinha  |   |  |
|    |    |    |
| Exemplar da espécie   | Porção da área em estudo vegetada com a espécie                                     | Inflorescência e reprodução vegetativa   |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i> - Pau-jacaré  |   |  |
|   |   |   |
| Exemplar da espécie   | Porção da área em estudo vegetada com a espécie                                     | Inflorescência   |
| <i>Sida sp</i> - Vassourinha  |   |  |
|  |  |  |
| Exemplar da espécie   | Porção da área em estudo vegetada com a espécie                                     | Inflorescência   |

Fonte: Da autora, mar./ jun. 2015.

### **4.3 Metodologia de coleta das amostras**

Foram efetuadas duas campanhas de campo sendo a primeira no período chuvoso (março/2015) e a segunda no período seco (junho/2015). Na primeira campanha foram coletadas 9 amostras de solos e 18 amostras de plantas. Na segunda campanha coletaram-se novamente 9 amostras de solos e 27 de plantas (uma amostra para cada uma das plantas selecionadas). Procurou-se utilizar como base para a determinação dos pontos de coleta tanto de solos como de plantas os mapas com isolinhas de concentração de metais pesados no solo elaborado pela empresa Carpathian Gold (FIGURA 4).

Em toda a área foram selecionados pontos com baixos teores de metais (aproximadamente o background local) e teores altos, indicando zonas que sofreram intensa atividade hidrotermal, portanto, mineralizadora. As amostras foram analisadas no Laboratório de Análises de Resíduos para Aproveitamento Agrícola do ICA-UFMG, onde foram tratadas conforme as metodologias e procedimentos adequados a este estudo.

#### **4.3.1 Coleta das amostras das plantas**

As espécies foram coletadas em ambas as áreas a fim de possibilitar o desenvolvimento de estudos comparativos entre as características que cada uma delas apresenta nas respectivas áreas em que ocorrem. A coleta foi feita aleatoriamente. Para cada planta ou um grupo de indivíduos próximos, ou seja, no raio de cada ponto georreferenciado, coletou-se: raízes, caules e folhas de cada espécie. As amostras foram armazenadas separadamente em sacos de papel, devidamente etiquetadas e a sua localização identificada por meio de coordenadas geográficas.

Em cada ponto foram coletadas uma ou mais amostras de plantas conforme a disponibilidade. A metodologia para a seleção das espécies vegetais considerou os seguintes parâmetros:

- Características das áreas quanto à concentração de metais pesados revelados pelas análises da empresa Carpathian Gold (FIGURA 4);

- Seleção das espécies considerando uma avaliação visual daquelas que ocorrem com mais frequência em ambas as áreas. As espécies identificadas foram: *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha*, *Senna obtusifolia*, *Sida sp.* e *Solanum capsicoides* (TABELA 6);
- Outro parâmetro considerado para a seleção das espécies com maior potencial para serem utilizadas nas investigações foi a capacidade da espécie em preservar a massa foliar durante o período de baixa precipitação. Para se obter esta informação procederam-se às coletas durante a estação chuvosa (março/2015) e no início do período de menor precipitação (junho/2015). Esse critério permitiu que fossem selecionadas três espécies dentre as cinco coletadas na primeira campanha. As espécies selecionadas foram: *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida sp.* (FIGURA 5).

As espécies descartadas foram: *Senna obtusifolia* e *Solanum capsicoides*. O descarte delas se deu pelo fato de que elas não ocorreram no período da segunda amostragem (período de estiagem), quando então perderam todas as folhas.

#### 4.3.2 Coleta das amostras de solos

As amostras de solos foram coletadas no entorno das plantas nas profundidades de 3 e 10 cm. Antes da retirada da amostra do solo, fez-se uma limpeza da superfície removendo-se os restos vegetais não decompostos, pedras maiores e cristais de quartzo e, após esse procedimento, coletou-se o solo em porções de aproximadamente 1 a 3 dm<sup>3</sup> em uma profundidade de 3 e 10 cm.

Essa metodologia de coleta tem como objetivo verificar se os fitólitos presentes no solo, naquele ponto de coleta, foram produzidos principalmente pela planta coletada naquele mesmo local.

O material coletado foi identificado e as anotações feitas em caderneta de campo (nome da amostra e coordenadas geográficas) e transportado até o Laboratório de Análise de Resíduos para Aproveitamento Agrícola do



ICA/UFMG, onde foi armazenado até o início dos trabalhos de preparação das amostras.

#### **4.4 Preparação das amostras**

Os grandes desafios para a avaliação de teores de metais em fitólitos de plantas e de solo foram:

- Pequenas quantidades de fitólitos extraídos;
- Sensibilidade dos metais nos fitólitos ao uso de ácidos em extração;
- Baixíssimas concentrações a determinar.

##### **4.4.1 Extração dos Sílico-fitólitos em Plantas**

A separação dos fitólitos em plantas foi feita pelo Método Parr *et al.* (2005). Após a coleta dos órgãos vegetais (caules, folhas e raízes), procedeu-se a lavagem do material primeiramente em água corrente e, posteriormente, em água destilada. Foram efetuadas 5 lavagens, sendo a primeira em água corrente e as demais em água destilada. Em seguida o material já identificado foi levado para secagem em estufa a 65 °C durante 4-5 dias.

As amostras de caules, folhas e raízes foram finamente trituradas em moinho do tipo facas e, em seguida, acondicionadas em sacos de papel para, posteriormente, serem depositadas em cadinhos e pesadas em balança analítica. A calcinação das amostras foi feita em mufla a 530 °C durante 6 horas (STEWART; ARTHUR, 1935; JONES; HANDRECK, 1967; PIPERNO; PEARSALL, 1993).

O material calcinado foi transferido para tubos de *Falcon*, previamente higienizados e pesados. Após a adição do material calcinado no tubo, pesou-se novamente o conjunto. A quantidade do material (amostra calcinada) utilizada foi de 1,2 g em média. Foram adicionados 10 ml de HCl a 10% ao material. Os recipientes foram aquecidos em banho-maria a 70 °C durante 20 min. Em seguida, fez-se a centrifugação e rinsagem. Esse procedimento foi

repetido por 4 vezes para se ter a completa remoção das impurezas. O tratamento com HCl foi feito para a remoção dos carbonatos.

Em seguida, foram adicionados 10 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 15% para remoção de compostos orgânicos. Foram feitas 4 rinsagens. Finalmente, foi adicionado álcool etílico a 100% para a secagem do material (por 12h). Após esse processo obteve-se os fitólitos os quais foram armazenados em saquinhos plásticos para análises.

#### **4.4.2 Extração dos Sílico-fitólitos em solos**

A extração dos fitólitos nos solos foi feita seguindo-se a metodologia desenvolvida por Kelly (1990) e modificada por Coe (2009). O material coletado (amostras de solos) foi seco em estufa por 24 horas a 110 °C. Após a secagem o material foi peneirado (< 2 mm) e ligeiramente macerado para se obter 20 g de solo seco.

No tratamento inicial os carbonatos foram eliminados com a adição de 30 ml de HCl (1N). Após cessar a reação, foram adicionadas algumas gotas de CaCl<sub>2</sub> para promover a floculação e facilitar a extração do sobrenadante. Essa operação foi repetida por três vezes. Na etapa seguinte, foi feita a solubilização do ferro utilizando-se Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> a 88,4 g L<sup>-1</sup> e Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. A operação foi repetida por 10 vezes para a completa remoção do Fe<sup>2+</sup> (forma dissolvida).

Para a oxidação da matéria orgânica, após o aquecimento das amostras a 100 °C, foram adicionadas algumas gotas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Para a completa eliminação da matéria orgânica foi necessário repetir a operação por cinco vezes.

A etapa seguinte foi a eliminação de argilas. Para isso, utilizou-se (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> e água aquecida a 70 °C. O processo foi repetido até a água ficar límpida, então foi acrescentado o floculante C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. Para a completa remoção das argilas foi necessário repetir a operação oito vezes. A penúltima etapa do processo de preparação das amostras para a extração dos fitólitos foi o peneiramento em malha de 250 µm e secagem em estufa.

A última etapa de preparo foi a separação densimétrica utilizando-se  $\text{CHBr}_3$ , cuja densidade é de  $2.889 \text{ g cm}^{-3}$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Os fitólitos extraídos foram acondicionados em recipientes onde foram pesados e armazenados para análises.

#### **4.5 Análises dos metais pesados nas amostras**

##### **4.5.1 Análises dos sílico-fitólitos por ICP-OES**

Os fitólitos foram pesados e dissolvidos com  $\text{HF}/\text{HNO}_3$ , conforme metodologia estabelecida no laboratório do NGqA do IGC da UFMG.

Procedimento:

- a) Pesar as amostras de  $\text{SiO}_2$  e amostras selecionadas;
- b) Colocar os béqueres com as amostras no banho de areia;
  - Adicionar 5 ml de  $\text{HNO}_3$  diluído e 5 ml de  $\text{HF}$ ;
  - Aquecer até  $200\text{-}300^\circ\text{C}$ ;
  - Deixar secar e colocar 3 vezes mais a mesma mistura;
  - Adicionar finalmente 5 ml de  $\text{HNO}_3$  10%, aquecer para dissolver e diluir com 25 ml  $\text{H}_2\text{O}$ .
- c) Transferir filtrando para um balão de 50 ml;
- d) Completar após resfriar até a marca;
- e) Transferir para uma garrafa e colocar na geladeira;
- f) Ler com ICP-OES, da marca Spectra, tipo SPECTROFLAME N<sup>o</sup> SÉRIE 4165/91. Os resultados são obtidos em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

##### **4.5.2 Análises das amostras de solos**

###### **4.5.2.1 Análise por FRX**

A fração fina das amostras de solo foi prensada e lida por FRX com um equipamento Shimatzu no Laboratório Multiusuário – LIPEMVALE da UFVJM - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. As

concentrações dos elementos são dados em % para os compostos em maior concentração e  $\text{mg kg}^{-1}$  para os compostos em menor concentração.

#### 4.5.2.2 Análise por ICP-OES

Alíquotas da fração fina (0,5 g) foram colocadas em tubos de *teflon*, misturadas com  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_3$  10% e  $\text{HNO}_3$  concentrado, nessa sequência; fechados e aquecidos em forno de micro-ondas, usando-se um programa elaborado no Laboratório do IGC. Após a extração os tubos foram abertos, filtrados e o líquido transferido para balão de 50 ml.

A leitura do material foi feita no equipamento ICP-OES da Marca SPECTRA. Para digestão foi utilizada a metodologia preconizada na resolução CONAMA 420/2009 (vigente no Brasil). Esse procedimento foi executado no equipamento micro-ondas MARS-CEM, usando o método SW-846-3051 (USEPA, 1998), que trata da digestão ácida de solos e sedimentos para obtenção da fração extraível dos metais.

Procedimento:

- a) Pesar 0,50 g da fração mais fina ( $< 0,063$  mm) e colocar nos tubos de *Teflon* do micro-ondas;
- b) Adicionar 10 ml de ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ );  $\text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{HNO}_3$  10%;
- c) Carregar o Método 3051 no equipamento (micro-ondas) e iniciar a operação;
- d) Após o resfriamento, filtrar as amostras usando filtros de nitrato de celulose de  $0,45\mu\text{m}$ ;
- e) Transferir as amostras filtradas para balões volumétricos de 50 ml e adicionar água deionizada, até completar o volume.

#### 4.6 Tratamento dos dados obtidos

A partir dos dados de análises obtidos foram calculados a média e o desvio padrão. As Tabelas geradas no Programa Excel 2013 – Microsoft foram utilizadas como base para os diagramas apresentados no trabalho.

Todos os dados com identificação específica de campo foram padronizados para os nove pontos de amostragem principais dos perfis. A distância entre os pontos de coleta e os pontos principais é  $< 4$  m. Esse valor é o desvio da determinação com GPS nos locais de amostragem no momento dos levantamentos.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

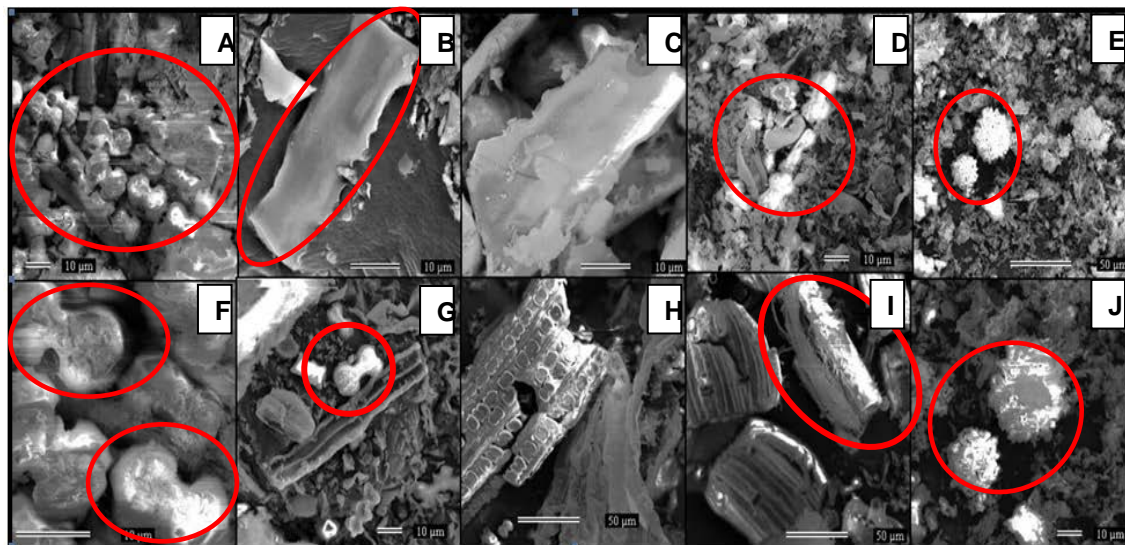
Os resultados são mostrados na forma de figuras, tabelas e diagramas com os valores analisados, sua variação, limites de detecção e localização geográfica.

### **5.1 Formas de fitólitos encontrados nas espécies analisadas**

A Figura 6 revela a aparência típica de sílico-fitólitos dos extratos das plantas. Para a identificação dos morfotipos tomou-se como referência os trabalhos de Madella *et al.* (2005), Piperno (2006), Medeanic *et al.* (2007; 2008) e Lu *et al.* (2007).

As observações e as análises evidenciaram a presença de diversas morfologias de fitólitos nas amostras, sendo que, o fitólito da forma Bilobate (microfotografias A, D, F e G) foi encontrado em quatro das dez amostras microfotografadas. Por outro lado, foram observadas pequenas quantidades de partículas estranhas ( $< 1\%$ ) nos extratos. Pela aparência dessas partículas, supõe-se que possam ser argilas residuais e partículas de quartzo que resistiram à limpeza inicial efetuadas nas amostras.

**Figura 6** - Microfotografias de algumas amostras de plantas com fitólitos. As figuras mostram os diversos morfotipos observados. As análises foram feitas no Centro de Microanálise do Instituto De Geociências da UFMG.



Legenda:

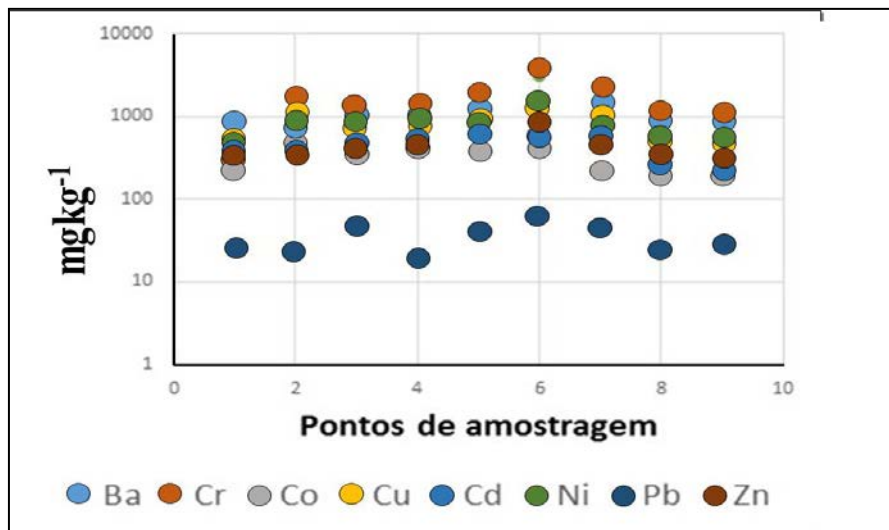
A = bilobate, B = elongate, C = elongate, D = bilobate, E = globular granulate, F = bilobate, G = bilobate, H = não identificáveis, I = buliforme paralelipedal, J = papillae.

Fonte: Da autora / 2016.

## 5.2 Concentrações de metais pesados no solo

As 18 amostras de solo analisadas, as quais corresponderam a duas amostragens em 9 pontos (FIGURA 7), revelam uma boa correlação com os mapas de isolinhas disponibilizados pela empresa de Mineração Carpathian Gold (FIGURA 4). Nesse caso, foram comparadas as concentrações totais de metais pesados do solo com testes de lixiviação de forças iônicas diferentes.

**Figura 7** - Distribuição dos elementos investigados nos pontos indicados nos mapas de isolinhas



Fonte: Da autora, 2015.

A sequência não segue a distribuição no perfil de campo. Pode-se ver que nos pontos 2, 5, 6 e 7 ocorrem concentrações mais altas dos elementos pesados, enquanto os outros pontos mostram principalmente a distribuição normal da concentração de elementos na região em questão. Os pontos 2 e 7 correspondem à região de isolinhas indicando anomalias de Zn, o ponto 5 anomalias de Pb e o ponto 6 a anomalia de Cu.

### 5.3 Concentrações de metais pesados nos fitólitos das plantas

A tabela 7 revela a concentração dos elementos nos sílico-fitólitos das plantas analisadas. O resíduo, após dissolução, é menor do que 0,01% e é formado por óxidos e outros compostos insolúveis decorrentes da superfície das plantas. Essa relação baixa se dá devido a uma limpeza minuciosa antes do procedimento de preparação dos fitólitos.

O principal componente dos fitólitos, o  $\text{SiO}_2$ , eliminado durante a preparação, possibilita a liberação dos metais, como íons, para a análise mais adequada dos elementos selecionados. Tal fato resulta em uma

eliminação de  $\geq 99,0$  a 99,9% de uma matriz que pode influenciar na exatidão da determinação.

Observa-se claramente a preferência dos metais pelos sílico-fitólitos das folhas, seguida pelas concentrações nos sílico-fitólitos extraídos dos caules.

**Tabela 7** - Concentrações médias de elementos químicos em sílico-fitólitos nos órgãos (folhas, raízes e caules) das espécies *Rollinia leptopetala* (bananinha), *Sida* sp (vassourinha) e *Piptadenia gonoacantha* (pau- jacaré)

| Espécies                                    | Órgão da planta | Elemento Químico    |       |     |        |     |       |        |         |         |        |
|---|-----------------|---------------------|-------|-----|--------|-----|-------|--------|---------|---------|--------|
|   |                 | Ba                  | Cr    | Co  | Cu     | Cd  | Ni    | Pb     | Ti      | Mn      | Zn     |
|   |                 | mg kg <sup>-1</sup> |       |     |        |     |       |        |         |         |        |
| <i>Rollinia leptopetala</i><br>Bananinha    | folha           | 61.021              | 49    | 293 | 6.329  | 216 | 5.434 | 1.603  | 21.886  | 112.016 | 17.171 |
|   | raiz            | 57.943              | 2.689 | 824 | 20.911 | 357 | 9.643 | 11.244 | 312.192 | 80.589  | 16.172 |
|   | caule           | 27.375              | 73    | 270 | 7.550  | 200 | 1.505 | 1.627  | 16.969  | 31.358  | 34.821 |
| <i>Sida</i> sp<br>Vassourinha               | folha           | 37.252              | 3.291 | 726 | 8.862  | 210 | 4.044 | 2.971  | 60.569  | 148.271 | 32.811 |
|   | raiz            | 8.526               | 3.352 | 580 | 3.489  | 642 | 2.563 | 3.580  | 74.659  | 37.813  | 32.670 |
|   | caule           | 90.686              | 717   | 461 | 8.785  | 182 | 2.892 | 2.061  | 26.316  | 75.980  | 32.314 |
| <i>Piptadenia gonoacantha</i><br>Pau jacaré | folha           | 19.788              | 193   | 157 | 5.290  | 127 | 874   | 1.825  | 8.068   | 92.732  | 22.714 |
|   | raiz            | 32.369              | 749   | 303 | 4.192  | 108 | 1.328 | 30.546 | 53.467  | 31.172  | 14.562 |
|   | caule           | 25.721              | 116   | 618 | 8.121  | 572 | 7.499 | 3.503  | 6.040   | 118.652 | 32.214 |

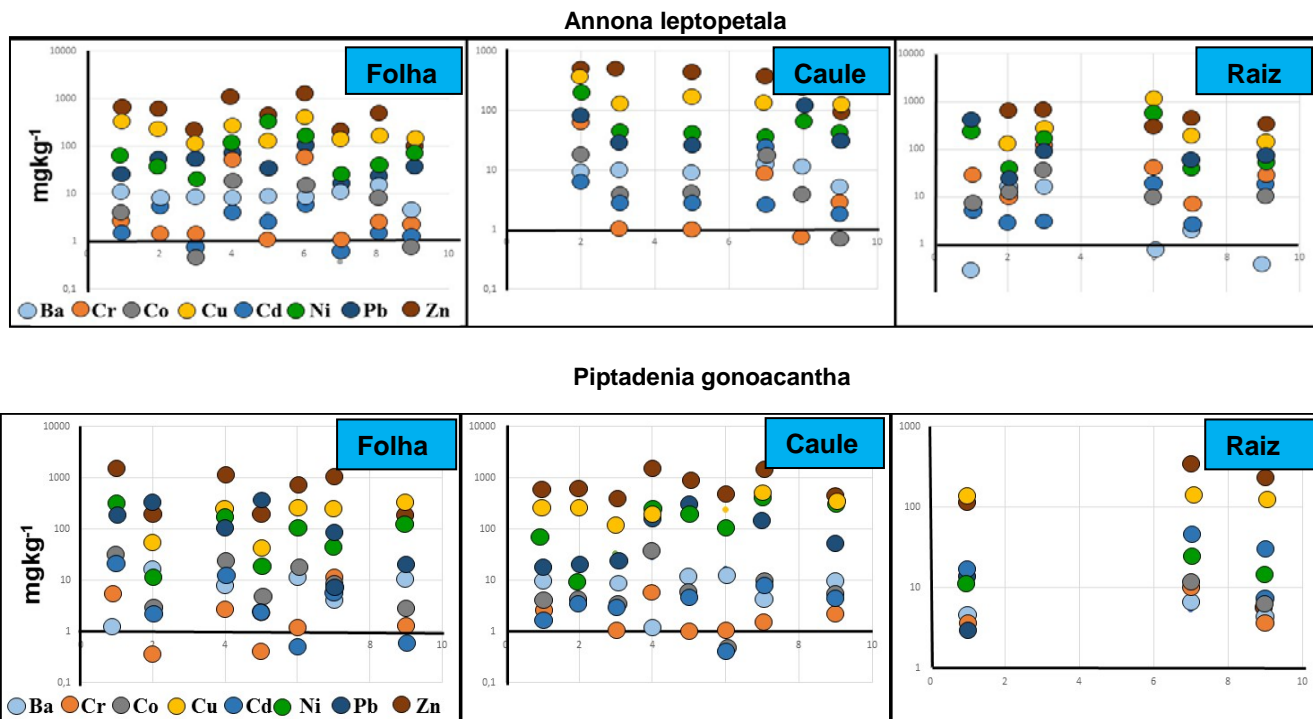
Fonte: Da autora, 2015.

A Figura 8 mostra as concentrações dos metais selecionados nos sílico-fitólitos nos órgãos vegetais analisados (caules, folhas e raízes) por espécie de planta estudada *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida* sp). Para as três espécies, observa-se que houve uma distribuição em correlação com as quantidades disponíveis do solo.



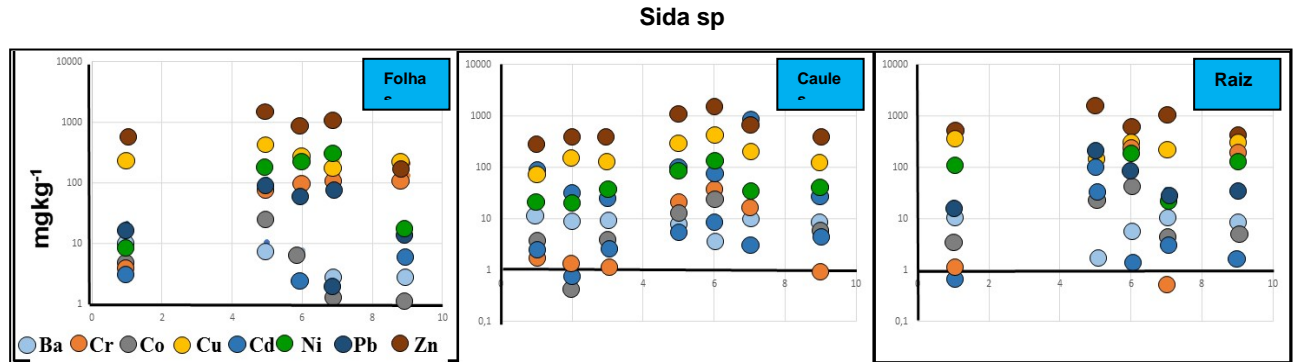
**Figura 8** - Distribuição dos metais pesados em órgãos das espécies *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida sp.*

(Continua)



**Figura 8** - Distribuição dos metais pesados em órgãos das espécies *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida sp.*

(Conclusão)

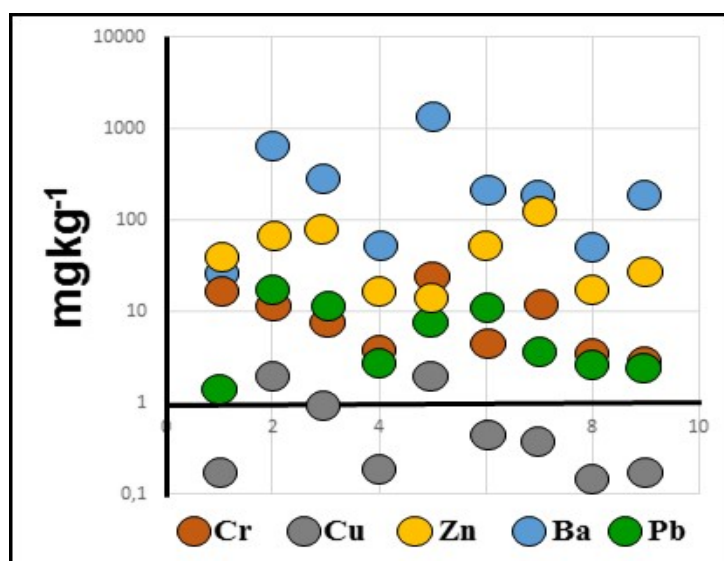


Fonte: Da autora, 2016.

#### 5.4 Concentrações de metais pesados nos sílico-fitólitos nos solos

Considera-se que os fitólitos pertençam principalmente às plantas investigadas, pela coleta próxima aos pontos de sua ocorrência. Todavia, não pode ser descartada a contribuição de outras fontes. Pode-se observar que as concentrações de elementos em fitólitos dos solos seguem a distribuição primária, o que é indicativo de que eles são provenientes de plantas dos locais de coleta (FIGURA 9 e TABELAS 8 e 9). Estas concentrações comparáveis com as plantas mostram que eles permanecem estáveis nestas partículas e não são disponibilizadas para o solo.

**Figura 9** - Diagrama semi-logarítmico das concentrações de metais pesados em fitólitos extraídos das amostras de solos



Fonte: Da autora, 2016.

**Tabela 8 -** Concentrações de metais em sílico-fitólitos coletados na área de estudo

| Amostra de Si-Fitólitos em solo | Cr   |      | Cu   |      | Zn   |      | Ba    |        | Pb  |      |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|-----|------|
|                                 | min  | max  | min  | max  | min  | max  | min   | max    | min | max  |
| mg kg <sup>-1</sup>             |      |      |      |      |      |      |       |        |     |      |
| Local de baixa concentração     | 0,17 | 3,5  | 0,16 | 0,17 | 17,4 | 27   | 24    | 184    | 1,2 | 3,6  |
| Local de alta concentração      | 4,5  | 15,2 | 0,9  | 1,9  | 13,4 | 76,6 | 178,3 | 1362,9 | 3,6 | 16,7 |

Fonte: Da autora, 2016.

**Tabela 9 –** Concentração de metais (mg kg<sup>-1</sup>) nos pontos de amostragem

| Amostra | Ba      | Cr      | Co     | Cu      | Cd    | Ni      | Pb     | Zn      |
|---------|---------|---------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|
| 1       | 875,40  | 309,74  | 200,37 | 440,42  | 28,00 | 420,00  | 250,00 | 300,13  |
| 2       | 1405,50 | 1393,30 | 522,40 | 699,63  | 22,17 | 973,53  | 720,63 | 1945,97 |
| 3       | 1166,91 | 1340,51 | 382,71 | 777,13  | 53,13 | 1093,17 | 588,62 | 1246,59 |
| 4       | 1010,07 | 1429,08 | 432,13 | 695,63  | 19,79 | 868,76  | 523,57 | 1291,31 |
| 5       | 1406,85 | 1789,47 | 347,63 | 873,30  | 43,85 | 1118,23 | 644,53 | 836,46  |
| 6       | 1642,17 | 3441,98 | 483,08 | 1043,35 | 68,01 | 3040,85 | 536,58 | 992,56  |
| 7       | 1504,29 | 756,08  | 231,71 | 625,65  | 50,97 | 807,38  | 615,60 | 1031,57 |
| 8       | 927,83  | 313,74  | 211,37 | 439,23  | 28,68 | 432,49  | 290,26 | 316,90  |
| 9       | 890,65  | 311,04  | 210,40 | 420,00  | 30,23 | 439,56  | 289,65 | 310,56  |

Fonte: Da autora, 2016.

### 5.5 Distribuição dos elementos selecionados em sílico-fitólitos nos órgãos das plantas investigadas

Os resultados obtidos na análise química revelam que existe uma captação de metais em fitólitos das plantas selecionadas. Apesar de todas as três espécies serem apropriadas para serem utilizadas para o processo de fitorremediação de elementos pesados, que estão sendo enriquecidos nos fitólitos das folhas, existe, porém, uma variação entre as concentrações máximas encontradas nas três plantas e em seus órgãos (TABELA 10).

**Tabela 10** - Relação entre espécies, órgãos das plantas e metais enriquecidos e concentrações atingidas

| Espécies                      | Órgãos da planta | Concentração mínima em solos com teores mais elevados de metais pesados |     |     |     | Concentração máxima em solos com teores menos elevados de metais pesados |     |      |      |
|-------------------------------|------------------|---|-----|-----|-----|--|-----|------|------|
|                               |                  | Cu  | Pb  | Zn  | Cd  | Cu   | Pb  | Zn   | Cd   |
| <b>mg kg<sup>-1</sup></b>     |                  |   |     |     |     |  |     |      |      |
| <b>Rollinia leptoptella</b>   | <b>Folhas</b>    | 110   | 20  | 177 | 0,7 | 415  | 91  | 1323 | 6,4  |
|                               | <b>Caules</b>    | 113   | 25  | 177 | 1,9 | 415  | 562 | 520  | 6,4  |
|                               | <b>Raízes</b>    | 25  | 24  | 331 | 2,2 | 1046   | 562 | 809  | 22,9 |
| <b>Piptadenia gonoacantha</b> | <b>Folhas</b>    | 41  | 17  | 211 | 0,5 | 315  | 415 | 1168 | 28,6 |
|                               | <b>Caules</b>    | 127   | 16  | 442 | 0,5 | 406  | 283 | 1610 | 28,6 |
|                               | <b>Raízes</b>    | 120   | 16  | 120 | 2,5 | 139  | 48  | 364  | 5,4  |
| <b>Sida sp</b>                | <b>Folhas</b>    | 221   | 17  | 212 | 2,3 | 443  | 112 | 1641 | 11   |
|                               | <b>Caules</b>    | 81  | 81  | 275 | 0,7 | 439  | 773 | 1615 | 5,9  |
|                               | <b>Raízes</b>    | 174   | 174 | 481 | 0,6 | 315  | 85  | 1634 | 32   |

Fonte: da autora, 2016.

Pode-se observar, na Figura 10, a comparação dos três elementos Cu, Zn e Pb, que são os principais focos do estudo. Na espécie *Rollinia leptoptella*, o Zn se enriquece principalmente nas folhas e menos no caule e nas raízes. Por outro lado, o Pb concentra mais no caule e nas folhas, enquanto o Cu concentra mais no caule e nas raízes. Todas as concentrações são compatíveis com a distribuição desses metais nas amostras de solo. Pode-se inferir que a saturação desses fitólitos ocorre em torno de 100 mg kg<sup>-1</sup> de metal com a exceção do caule, que concentra Cu até aproximadamente 1.000 mg kg<sup>-1</sup>.

A *Piptadenia gonoacantha* enriquece quantidades maiores de metais do que a *Rollinia leptoptala* (FIGURA 10). Principalmente o caule e folhas concentram Cu, Zn e Pb. A saturação ocorre conforme altos teores no solo. As raízes, por outro lado, mostram concentrações semelhantes à *Rollinia leptoptala*.

A espécie *Sida sp.* concentra quantidades maiores de Zn e Pb nas raízes, ao contrário das outras espécies que concentram Cu nas folhas

(FIGURA 10). As concentrações máximas encontradas estão bem semelhantes a da *Piptadenia gonoacantha* e bem mais altas do que da *Rollinia leptopetala*. Vê-se uma clara correlação entre concentrações no solo e nos sílico-fitólitos.

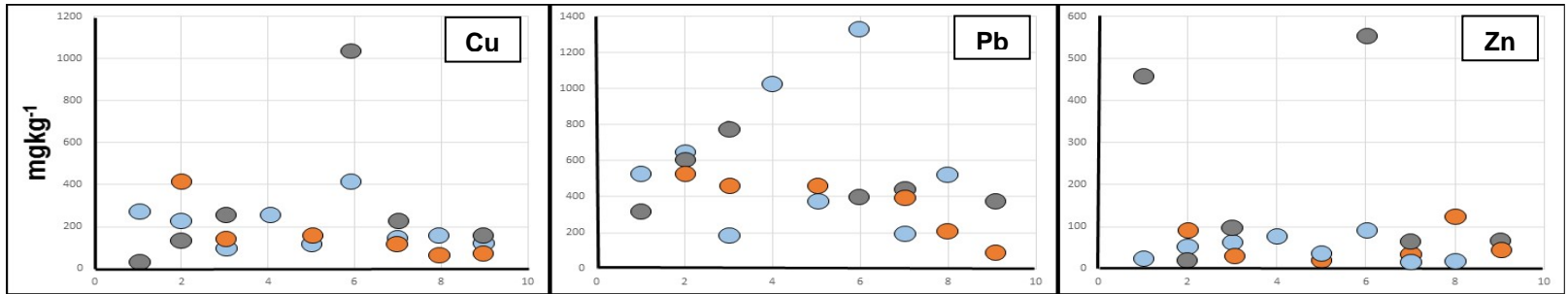
Observa-se que a variação desses elementos ocorre conforme a concentração nos solos e que, também, o Cu enriquece mais nas raízes. As amostras de caule mostram concentrações intermediárias e as das folhas, altas concentrações, o que era de se esperar devido ao fato desta última ser o ponto final do transporte de líquidos com elementos. Desde as raízes até as folhas ocorre uma redução da quantidade de líquido e um aumento relativo da concentração, havendo conseqüentemente precipitação sequencial dos metais conforme a sua solubilidade.

As concentrações dos metais encontrados em fitólitos seguem a distribuição das concentrações encontradas em amostras de solo dos mesmos locais. Observa-se em alguns pontos uma concentração atípica de elementos e a redução de outros. Deve ser um efeito da competição entre os elementos conforme facilidade de se ligar ao  $\text{SiO}_2$  e também dos processos de concentração segundo as necessidades das plantas.

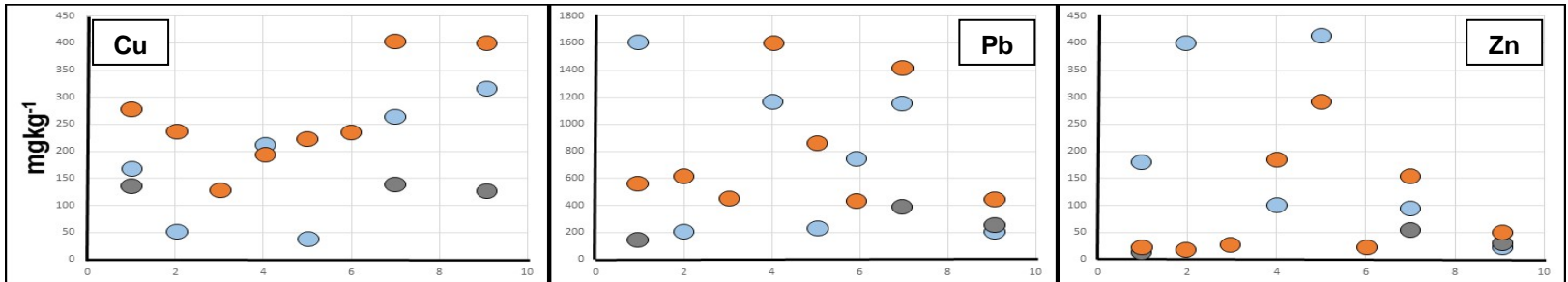
**Figura 10** - Distribuição de metais selecionados (Cu, Pb e Zn) em órgãos das espécies *Annona leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida sp.*

(Continua)

***Annona leptopetala***



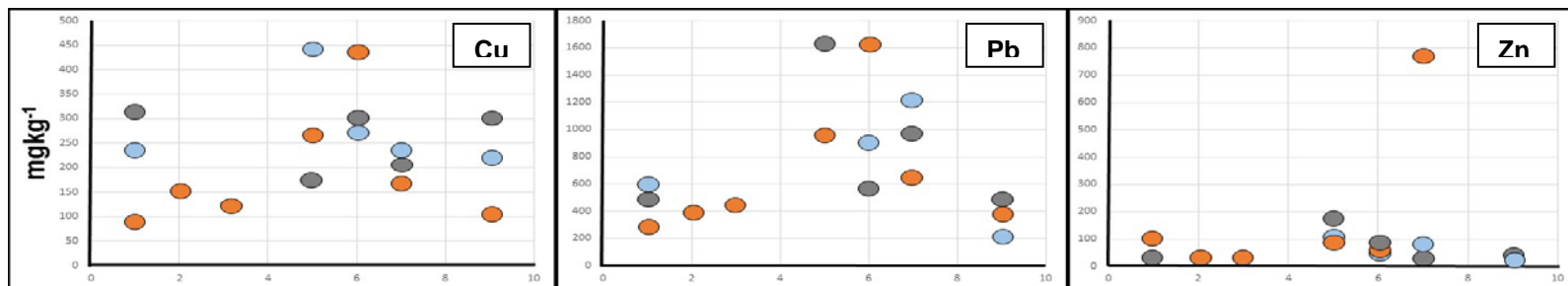
***Piptadenia gonoacantha***



**Figura 10** - Distribuição de metais selecionados (Cu, Pb e Zn) em órgãos das espécies *Annona leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida sp.*

(Conclusão)

*Sida sp.*



Legenda:

Folha



Caule



Raiz



Fonte: Da autora, 2016.

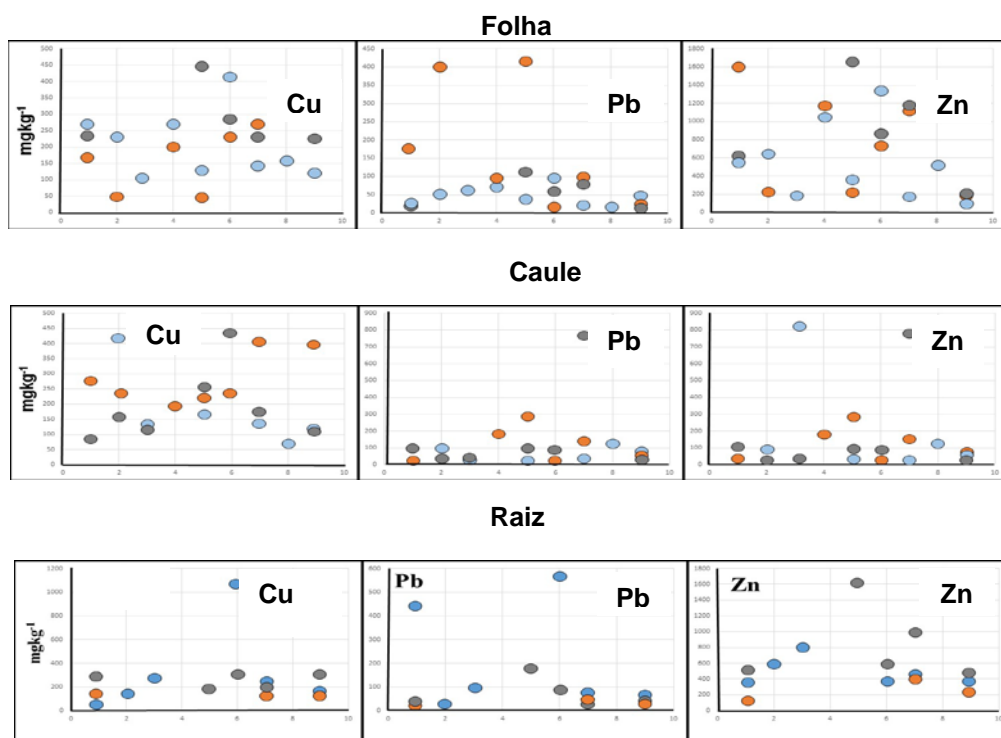


Na Figura 11, observam-se as concentrações de Cu, Zn e Pb nos diferentes órgãos das espécies selecionadas. Para as folhas, os valores dos elementos chegam a 400-450 mg kg<sup>-1</sup> em alta concentração, mas ocorrem normalmente entre 50 e 300 mg kg<sup>-1</sup>. Dentre as três espécies, a *Rollinia leptopetala* concentra mais Zn nas folhas seguida pelas demais. Nas outras espécies começa a concentração de metais nos sílico-fitólitos já com baixas concentrações no solo, mas não atinge os valores da *Rollinia leptopetala*. A *Piptadenia gonoacantha* concentra mais Pb nas folhas, enquanto os outros têm valores mais baixos. A *Rollinia leptopetala* e *Sida* sp. concentram mais Cu do que *Piptadenia gonoacantha* nesse órgão.




As concentrações atingidas no caule normalmente chegam a 100-300 mg kg<sup>-1</sup> e somente em áreas com alta concentração dos três metais ocorre concentração de até 400-1600 mg kg<sup>-1</sup>. A distribuição dessas regiões com alta concentração dos três elementos ocorre não muito regularmente nas três plantas e deve ser influenciada por outros fatores como outros elementos, transporte de fluídos, processos de redução de volumina, dentre outros.

Nas raízes, as concentrações dos três metais movimentam-se na faixa de 50 a 300 mg kg<sup>-1</sup>, com a exceção do Zn que chega facilmente a 500 mg kg<sup>-1</sup>. Somente nos pontos de coleta em cima de uma anomalia, as raízes também mostram concentrações altas chegando até 500-1800 mg kg<sup>-1</sup> de metal. Parece que as concentrações nos fitólitos das raízes não são tão especificamente ligadas a concentração geral do substrato, mas a outros fatores como entrada de outros metais, ambiente de dissolução e transporte e/ou diferenças térmicas que levam ao transporte em partes mais elevadas das plantas.

**Figura 11** - Distribuição de Cu, Pb e Zn nos órgãos das espécies *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida* sp.



Legenda:

*Piptadenia gonoacantha* sp.  *Rollinia leptopetala*  *Sida* sp. 

Fonte: Da autora, 2016.

## 5.6 Relação entre material orgânico e fitólitos

Foram investigadas três diferentes espécies: *Rollinia leptopetala*, *Piptadenia gonoacantha* e *Sida* sp.

A Tabela 11 a seguir mostra, que a partir de 1kg de planta seca em estufa, a melhor distribuição nos órgãos das plantas investigadas na produção de fitólitos é encontrada na espécie *Rollinia leptopetala*. A maior

produção por órgão é verificada nas folhas da espécie *Sida* sp e a menor produção de fitólitos por órgão da planta é encontrada nas raízes dessa espécie.

No total de produção de fitólitos por planta, o menor valor é encontrado na *Piptadenia gonoacantha*.

**Tabela 11** - Relação entre peso seco e quantidade de Si-fitólitos. O peso seco da planta inicial calculado de 1kg

| Espécie                       | Órgãos | Peso médio 980°C (g)<br>P <sub>c</sub> | Relação ps /pc (%) | Peso médio (g)<br>P <sub>r</sub> | Relação P <sub>s</sub> /P <sub>r</sub> (%) |
|-------------------------------|--------|--|--------------------|----------------------------------|--|
| <b>Rollinia lepdoptella</b>   | Folhas | 109,76                                 | 11                 | 15,18                            | 1,5  |
|                               | Caules | 88,86                                  | 8,9                | 13,12                            | 1,3  |
|                               | Raízes | 76,84                                  | 7,7                | 15,48                            | 1,6  |
| <b>Piptadenia gonoacantha</b> | Folhas | 70,38                                  | 7                  | 13,67                            | 1,4  |
|                               | Caules | 74,98                                  | 7,5                | 8,62                             | 0,9  |
|                               | Raízes | 35,98                                  | 3,6                | 8,20                             | 0,8  |
| <b>Sida</b> sp.               | Folhas | 90,97                                  | 9,1                | 22,71                            | 2,2  |
|                               | Caules | 98,86                                  | 9,9                | 16,39                            | 1,7  |
|                               | Raízes | 85,75                                  | 8,6                | 7,71                             | 0,8  |

Legenda: pc: peso calcinado; ps: peso seco; pf: peso fitólitos.

Fonte: Da autora, 2016.

### 5.7 Disponibilidade dos metais selecionados para as plantas em comparação com as concentrações dos Si-Fitólitos

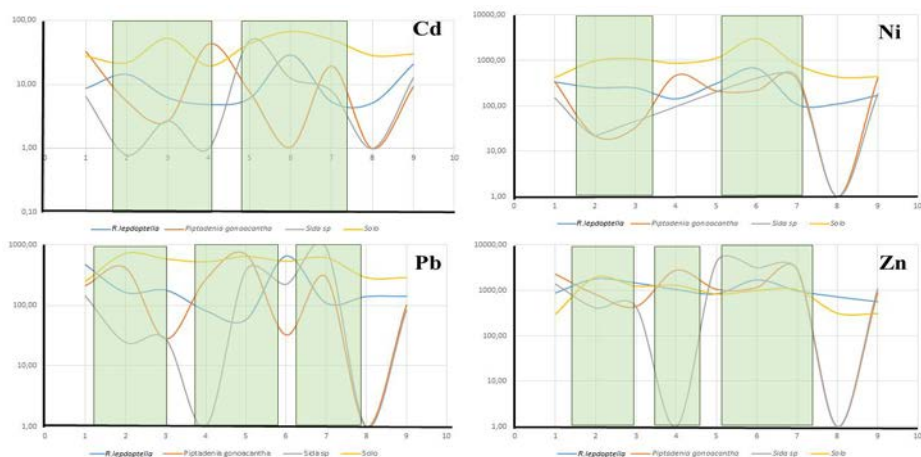
Pode-se observar que as concentrações disponíveis de metais pesados (solúvel em água/ácido fraco) diminuem com o aumento da concentração desses elementos nos sílico-fitólitos (FIGURA 12).

As concentrações mostram uma variação tanto nas amostras do solo quanto nos sílico-fitólitos das plantas, sendo que as concentrações de metais nos sílico-fitólitos das espécies *Sida* sp. e *Leptopedela* indicam mais fielmente as anomalias do solo, ou seja, os pontos de maior concentração no solo.

A espécie *Piptadenia gonoacantha* tem altas concentrações de Cd, Ni e Cu nas regiões com baixo teor desses metais. Isso pode ser um efeito de

transporte por água superficial e a captação pelas plantas desta espécie ou ligado a propriedades do solo ou propriedades destes íons.

**Figura 12** - Relação da concentração de metais selecionados (Ba, Cr, Co, Cu, Cd, Ni, Pb e Zn) em amostras do solo e amostras dos fitólitos das plantas (concentração média das plantas). As concentrações em solo são os resultados de análises com FRX. Os pontos 2, 5, 6 e 7 representam as anomalias indicados nos mapas de isolinhas de teores de Cu, Zn e Pb.



Fonte: Da autora, 2016.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho contribui para a ampliação do conhecimento sobre a fitorremediação em áreas ocupadas pelos biomas Cerrado e Caatinga. Este estudo foi iniciado para identificar plantas que satisfazem certas condições básicas como: sazonalidade das espécies, abundância, produção de massa seca e resistência ao déficit hídrico. Foram selecionadas três plantas para maior investigação.

Os métodos de separação/preparação dos fitólitos constituem-se em grande desafio, pois são limitadas em vários sentidos:

- a. Separam todo tipo de  $\text{SiO}_2$  amorfo ou microcristalino existente na planta e no solo;
- b. Alguns reagentes utilizados podem reduzir a concentração de metais aprisionados devido a sua agressividade;
- c. Os processos de purificação dos sílico-fitólitos são estabelecidos para usar o material residual para uma identificação visual e não química. A última dificuldade requer uma limpeza muito mais intensa do que aquela normalmente empregada para se fazer a avaliação morfológica.

Dessa forma, precisou-se aceitar um certo erro e um problema com a pureza do concentrado, seja das plantas (menor problema), seja do solo (maior; devido a outros resíduos de plantas e animais do tipo  $\text{SiO}_2$ , pequenas quantidades de argila, e óxidos).

As investigações revelam que os resíduos desses compostos, ocorrendo como precipitado na dissolução com  $\text{HF}/\text{HNO}_3$  ficaram abaixo de 5% relativa à quantidade dos Si-fitólitos e concluímos que podem ser negligenciados.

Constatou-se, em outros trabalhos e na literatura sobre propriedades químicas e geoquímicas, que os eventuais metais adsorvidos a argilominerais e óxidos são mais facilmente extraídos do que de sílico-fitólitos e, assim, eles

podem ser perdidos durante a preparação. A influência de peso do material não-silicático é muito pequena em relação ao total dos fitólitos e, assim, não deve influenciar muito para uma primeira aproximação, nos valores dos metais aprisionados. Obviamente que os efeitos observados durante este trabalho precisam ser futuramente estudados com mais detalhes.

Estas foram as principais limitações encontradas na preparação das amostras para a extração de fitólitos:

A metodologia empregada para a análise foi desenvolvida no laboratório a partir de práticas e métodos comumente empregados com base em metodologias comuns para a abertura de minerais e rochas já em execução para fins geológicos.

Foram selecionados procedimentos que dissolvem o  $\text{SiO}_2$  amorfo sem perda de íons, limitando o aprisionamento de metais em eventuais precipitados a base de  $\text{Fe}^-$  limitando a dissolução ao objetivo do processo.

Estes resultados de análises dos Si-fitólitos das plantas e dos Si-fitólitos separados do solo mostram que as concentrações verificadas neles são interessantes para indicar o seu uso como concentrador de metais.

Todos os erros introduzidos pela separação, preparação e pela metodologia analítica não alteraram os resultados obtidos.

Este é um estudo que teve como enfoque identificar espécies em campo capazes de enriquecer e fixar metais específicos nos Si-fitólitos. A metodologia utilizada na identificação dessas espécies e da área de ocorrência não permitiu o emprego de estudos estatísticos devido ao fato de que as características e propriedades existentes (concentração, umidade, temperatura, composição do solo e concentração de metais, transporte, lixiviação etc.), na área investigada não puderam ser exatamente determinadas.

Pode-se afirmar, levando em consideração as peculiaridades de um trabalho de campo, que as plantas estudadas têm esta capacidade em função da deposição de  $\text{SiO}_2$  em seus órgãos.

Com a coleta de três amostras de planta por ponto e duas amostras de solo vê-se esta correlação entre a concentração no solo, nas plantas (Si-fitólitos) e nos sílico-fitólitos do solo. A variação nas concentrações de metais

em amostras de solo bastante próxima mostra a problemática da variação de fatores *in situ*.

Para obter valores quantificados e mais limitados, precisa-se executar trabalhos em laboratório (casa de vegetação) sob condições extremamente controladas. Desta forma, será possível desenvolver os estudos sob condições controláveis e, portanto semelhantes para todas as amostras e então desenvolver estudos estatísticos mais precisos. Uma pesquisa nesta linha de procedimento permitirá a obtenção de conhecimentos mais profundos podendo-se chegar a uma avaliação econômica do processo.

## 7 CONCLUSÕES

Baseando-se nas observações de campo, durante as duas campanhas, nos resultados das separações e nos resultados das análises químicas dos fitólitos e dos solos pode-se concluir:

1. Nem todas as plantas coletadas podem ser usadas para o processo de fitorremediação com sílico-fitólitos devido a sua aparente sazonalidade;
2. As plantas selecionadas estão altamente adaptadas às condições dos biomas (Cerrado e Caatinga) e ocorrem sob condições extremas (déficit hídrico prolongado);
3. As plantas selecionadas para este trabalho sintetizam quantidades significativas de sílico-fitólitos em todos os seus órgãos;
5. Os sílico-fitólitos concentram os metais em diferentes quantidades. Esse fato deve ocorrer em função da formação dos fitólitos e das peculiaridades da circulação dos fluídos;
6. Existem variações entre as concentrações de metais específicos, espécie e concentração de metais em partes dessas espécies;
7. Os fitólitos das amostras de solos coletadas nas proximidades das plantas apresentaram concentrações de metais semelhantes às das mesmas;
8. Usando dados mineralógicos e químicos sobre opala biogênica da literatura, foi possível confirmar o longo tempo de permanência estável dessas estruturas sob as condições do local em centenas a milhares de anos;
9. Vê-se uma clara relação entre enriquecimento nos sílico-fitólitos e a concentração de metais no solo;
10. Os teores encontrados em fitólitos correspondem aos valores imóveis encontrados no solo.

Baseando-se nos resultados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que as espécies *Sida sp*, *Rollinia leptopetala* e *Piptadenia gonoacantha*



podem ser utilizadas para reduzir a disponibilidade de metais pesados do solo para as plantas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. M.; TAVARES, M.T.; BATISTA, M.J. Potential use of *Erica andevalensis* and *Erica australis* in phytoremediation of sulphide mine environments. **Journal of Geochemical Exploration**, São Domingos, Portugal, p. 210-222, 2008.

AB' SABER, A. N. Contribuição a geomorfologia da área dos Cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EDUSP, 1971. p. 97-103.

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1. p. 299-352. 2000.

AGARIE, S.; AGATA, W.; UCHIDA, H.; KUBOTA, F.; KAUFMAN, P. B. Function of silica bodies in the epidermal system of rice (*Oryza sativa* L.): Testing the window hypothesis. **J. Exper. Bot.**, v. 47, p. 655-660, 1996.

AGUIRRE, C.; CHÁVEZ, T.; GARCÍA, P.; RAYA, J. C. El silicio en los organismos vivos. **Interciencia**, v.32, p. 504–509, 2007.

ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J. D.; COLIN, F.; KOUD, J. M. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v. 61, p. 677-682, 1997.

ALLOWAY, B. J. **Heavy Metals in soils**. 2. ed. London: Blackie Academic & Professional, 1995. 368 p.

ANZECC-ARMCANZ. **Australian guidelines for water quality monitoring and reporting**. 2000. Disponível em: <<http://www.ea.gov.au/water/quality/nwqms/#monitor>>. Acesso em 20 jan. 2015.

BAGGIO, H. F. **Alterações na Paisagem Natural e Agrícola do município de Buritizeiro - MG**: implicações do plantio generalizado de pinus e eucalipto no meio físico, biológico e sócio-econômico. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

BAGGIO FILHO, H. **Contribuições naturais e antropogênicas para a concentração e distribuição de metais pesados em água superficial e sedimento de corrente na Bacia do Rio do Formoso, município de Buritizeiro, MG**. 2008. 2016 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERIA, N. K.; DATNOFF, L. E.; SILVA, O. F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2., p. 325-330, abr./jun. 2001.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Respuesta de las Plantas a la Contaminación por metales pesados. **Suelo y Plantas**, v. 2, n. 2, p. 345-361, 1992.

BERTOLDI DE POMAR, H. Los silicofitolitos: sinópsis de su conocimiento. **Darwiniana**, v. 19, p. 173-206, 1975.

BIRCHALL, J. D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, p. 24, 1995.

BRINGEZU, K.; LICHTENBERGER, O.; LEOPOLD, I.; NEUMANN, D. Heavy metal tolerance of *Silene vulgaris*. **J. Plant Physiol.** v. 154, p. 536–546, 1999.

BUJÁN, E.; SAIZ, J. L.; CEACERO, C. J.; MACIAS, F. Relaciones suelo-planta en comunidades de *Erica andevalensis* en suelos de mina de la Faja Pirítica andaluza. In: BELLIFANTE, Nicolás; JORDÁN, Antonio (Eds.). **Tendencias Actuales de la Ciencia del Suelo**. Sevilla: University of Sevilla, 2007. p. 938-946.

BUJÁN, E. Elemental composition of phytoliths in modern plants (*ERICACEAE*). **Quaternary International**, n. 287, p. 114-120, 2013.

CALEGARI, M. R. **Ocorrência e significado paleoambiental do horizonte a húmico em Latossolos**. 2008. 259 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

CAMPOS, A. C.; LABOURIAU, L. G. Corpos silicosos de gramíneas dos cerrados II. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 4, p. 146-151, 1969.

CARNELLI, A. L.; MADELLA, M.; THEURILLAT, J. P.; AMMANN, B. Aluminum in the opal silica reticule of phytoliths: A new tool in palaeoecological studies. **Am. J. Bot.**, v. 89, p. 346-351, 2002.

CARVALHO, P. E. R. **Pau-Jacaré: *Piptadenia gonoacantha***. Colombo, PR: EMBRAPA, 2004. 12 p. (Embrapa florestas. Documentos, 91). Disponível em: < <http://www.cnpf.embrapa.br/publica/circtec/edicoes/circ-tec91.pdf> >. Acesso: 30 set. 2015.

COE, H. **Estudo de fitólitos**: protocolo de extração de fitólitos e extração de sedimentos de solos. Rio de Janeiro: Departamento de geografia; UERJ/FFP, 2009.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009. Diário Oficial da União nº 249, de 30 de dezembro de 2009. p. 81-84.

COSTA, C. das N. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul**. 110 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.

CROCCO, F. A.; ABREU, F. R. de; TEIXEIRA, N.; CANÇADO, F. L. L.; MACIAEL, J. D. SENA, F.; RAMOS, M. M. Mineralizações de zinco e chumbo do depósito salobro, Porteirinha, MG. **Geociências**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 359-378, 2006.

CROCCO-RODRIGUES, F. A.; GUIMARÃES, M. L. V.; ABREU, F. R. de; GRECO F. M. Evolução tectônica do bloco Itacambira-Monte Azul entre Barroco e Porteirinha (MG). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 4., 1993, Belo Horizonte. **Resumos...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993. p. 212-216.

DAYANANDAM, P.; KAUFMAN, P. B.; FRAKIN, C. I. Detection of silica in plants. **American Journal of Botanic**, New York, v. 70, p. 1079-1084, 1983.

DING, T. P.; MA, G. R.; SHUI, M. X.; WAN, D. F.; LI, R.H. Silicon isotope study on rice plants from the Zhejiang province, China. **Chemical Geology**, v. 218, n. 1-2, p. 41-50, 2005.

DUBOC, E. **Cultivo de espécies nativas do bioma cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. (Comunicado Técnico, 110).

ELBAUM, R.; WEINER, S.; ALBERT, R. M.; ELBAUM, M. Detection of burning of plant materials in the archaeological record by changes in the refractive indices of siliceous phytoliths. **Journal of Archaeological Science**, v. 30, p. 217-226, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 95 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 63).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, n. 1, p. 11-17, 1994.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999.

FAUTEUX, F; RÉMUS-BOREL, W; MENZIES, J. G., BÉLANGER, R. R. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. **FEMS Microbiology Letters**, v. 249, p. 1-6, 2005.

FONSECA, E. D. A. **Depósito Aurífero de Riacho dos Machados, Norte de Minas Gerais**: hidrotermalismo, deformação e mineralização associada. 1993. 179 f. Tese (Mestrado) – Instituto de Geociências, UFMG, Belo Horizonte, 1993.

Guimarães, M. L. V.; GROSSI-SAD, J. H.; FONSECA, E. D. Geologia da folha Francisco Sá. In: GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; SOARES FILHO, B. S. (Coords.). **Projeto espinhaço em CD-ROM**: textos, mapas e anexos. Belo Horizonte: COMIG, 1997. p. 223-313.

HENRIET, C.; BODARWE, L.; DOREL, M.; DRAYE, X.; DELVAUX, B. Leaf silicon content in banana (*Musa* spp.) reveals the weathering stage of volcanic ash soils in Guadeloupe. **Plant and soil**, v. 313, n. 1, p. 71-82, 2008.

HILDEBRAND, M. Biological processing of nanostructured silica in diatoms. **Progress Organic Coatings**, v. 47, p. 256-266, 2003.

HODSON, M. J.; SANGER, A. G. Aluminium silicon interactions in conifers. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 76, p. 89-98, 1999.

\_\_\_\_\_. Silicon and abiotic stress. International In: Conference on Silicon in Agriculture, 2., 2002, Tsuruoka, Japan, **Anais...** Tsuruoka, Japan, 2002.

HODSON, M. J.; EVANS, D. E. Aluminium and silicon interactions in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 46, p. 161-171, 1995.

ILLER, R. K. **The chemistry of silica**: solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry. New York: Wiley-Interscience, 1979.

Instituto Brasileiro de Geografia Estatística - IBGE. **Cidades@**. Informações sobre os municípios brasileiros. 2014. Disponível em: < [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) >. Acesso em: 25 ago. 2015.

Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília: MMA, 2006. 148 p.

JAFFRÉ, T.; BROOKS, R. R.; LEE, J.; REEVES, R. D. *Sebertia acuminata*: a hyperaccumulator of Nickel from New Caledonia. **Science**, p. 579-580, 1976.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants and animals. **Advs. Agron.** v. 19, p. 107-149, 1967.

KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V. A.; CORRÊA, G. F.; SNYDER, G. H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 23, p. 635-41, 1999.

KONDO, R.; SASE, T. Opal phytoliths, their nature and application. **Quarter. Res.**, p. 25:31-63, 1986.

LIMA, I. L. P.; MEDEIROS, M. B.; SEVILHA, A. C. Diversidade e uso de plantas do Cerrado em comunidade de Geraizeiros no norte do estado de Minas Gerais, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 3, p. 675-684, 2012.

LEWIN, J.; REIMANN, B. E. F. Silicon and plant growth. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 20, p. 289-304, 1969.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa, SP: Plantarum, 1998. v. 2.

\_\_\_\_\_. **Plantas Daninhas do Brasil**: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. 4. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008. p. 672.

LUCAS, Y.; LUIZAO, F. J.; ROUILLER, J.; NAHON, D. The relationship between the biological activity of the rain forest and the mineral composition of the soils. **Science**, v. 260, p. 521-523, 1993.

LU, H. Y.; WU, N. Q.; LIU, K. B.; JIANG, H.; LIU, T. S. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: Palaeoenvironmental reconstruction in the loess plateau. **Quaternary Science Reviews**, v. 26, n. 5, p. 759-772, 2007.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, M. E. (Ed.); KORNDÖRFER, G. H. (Ed.); SNYDER, G. (Ed.). **Silicon in Agriculture**. New York. Elsevier science, 2001. p. 17-39.

MADELLA, M.; ALEXANDRE, A.; BALL, T. International code for phytolith nomenclature 1.0. **Annals of Botany**, v. 96, n. 2, p. 253-260, 2005.

MADELLA, A. The Phytolith Assemblage. In: Cook, M.; Dunbar, L. (Eds.) *Rituals, Roundhouses and Romans (Kintore)*. **Scottish Trust for Archaeological Research**, Edinburgh, p. 290-292, 2008.

MAGALHÃES, G. M. Sobre os cerrados de Minas Gerais. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, v. 38, p. 59-70, 1966.

MÁRQUEZ-GARCÍA B.; ÁNGELES FERNÁNDEZ, M.; CÓRDOBA, F. Phenolics composition in *Erica* sp. differentially exposed to metal pollution in the Iberian Southwestern Pyritic Belt. **Bioresource Technology journal**, 2008. Disponível em: < [www.elsevier.com/locate/biortech](http://www.elsevier.com/locate/biortech) >. Acesso em: 15 set. 2015.

MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CURSICOL, C.A.C. & CORRÊA, J.C. Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 5, p 867-873, 2003.

MEDEANIC, S.; DILLENBURG, S. R.; WESCHENFELDER, J. Palinomorfos nos sedimentos de fundo de laguna dos Patos, RS: Aplicação nas reconstruções paleoambientais. **Gravel**, v. 5, n. 1, p. 89-102, 2007.

MEDEANIC, S.; CORDAZZO, C. V.; CORRÊA, I. C. S.; MIRLEAN, N. Os Fitólitos em Gramíneas de Dunas do Extremo Sul do Brasil: variabilidade morfológica e importância nas reconstruções paleoambientais costeiras. **Gravel**, v. 6, n. 2, p.1-14, 2008.

MELO, E. E. C.; NASCIMENTO, C. W. A.; SANTOS, A. C. Q. Solubilidade, fracionamento e fitoextração de metais pesados após aplicação de agentes quelantes. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 30, p. 1051-1060, 2006.

MEUNIER, J. D. Le rôle des plantes dans le transfert du silicium à la surface des continents. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 335, n. 16, p. 1199-1206, 2003.

MEURER, E.J. **Fundamentos de Química de Solo**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Gênese, 2004. p. 290.

MONTES-BOTELLA, C. Condicionamientos Ambientales de *Erica andevalensis* Cabezudo & Rivera. Respuesta frente a Metales Pesados. Thesis (PhD) – University Polytechnic of Madrid, Spain, 2001.

NIMER, E. Clima. In: IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geografia do Brasil: região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1973. p. 35-79.

\_\_\_\_\_. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 421 p.

OLIVEIRA, L.A.; CASTRO, N. M. Ocorrência de Sílica nas folhas de *Curatella americana* L. e de *Davilla elliptica* St. Hil. **Rev. Horizonte Científico**, 2002. Disponível em: < [www.propp.ufu.br/revistaeletronica/B/OCORRENCIA.pdf](http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/B/OCORRENCIA.pdf) >. Acesso em: 27 set. 2015.

PARR, J. F.; LENTFER, C. J.; BOYD, W. E. A comparative analysis of wet and dry ashing techniques for the extraction of phytoliths from plant material. **Journal of Archaeological Science**, v. 28, p. 875-886, 2001.

PARR, J. R.; SULLIVAN, L. A. Sequestro de carbono no solo phytoliths. **Soil Biology & Biochemistry**, Austrália, v. 37, n. 1; p. 117-124, 2005.

PARRY, D. W.; SMITHSON, F. Types of opaline silica depositions in the leaves of British grasses. **Annals of Botany**, v. 28, n. 1, p. 169-185, jan. 1964.

PIPERNO, D. R.; PEARSALL, D. M. Phytoliths in the reproductive structures of Maize and Teosinte: implications for the study of Maize evolution. **Journal of Archaeological Science**, v. 20, p. 337-362, 1993.

PIPERNO, D. R. **Phytolith analysis**: An archaeological and geological perspective. London: Academic Press, 1988.

\_\_\_\_\_. The Status of Phytolith Analysis in the American Tropics. **Journal of World Prehistory**, v. 5, n. 2, p.155-191, 1991.

\_\_\_\_\_. **Phytoliths**: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists. Lanham MD: Alta Mira Press, 2006. p. 238.

PRYCHID, C. J.; RUDALL, P. J.; GREGORY, M. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. **Botanical Review**, v. 69, p. 377-440, 2004.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, v. 58, p. 179-207, 1983.

ROSSINI-OLIVA S.; MINGORANCE, B; VALDÉS E.; LEIDI, O. Uptake, localisation and physiological changes in response to copper excess in *Erica andevalensis*. **Plant Soil**, v. 328, p. 411-420, 2010.

ROSSINI, S.; MINGORANCE, M. D.; LEIDI, E. O. Effects of silicon on copper toxicity in *Erica andevalensis* Cabezudo and Rivera: a potential species to remediate contaminated soils. **Journal of Environmental Monitoring**, v.13, p. 591-596, 2011.

RUNGE, F. The opal phytolith inventory of soils in Central Africa – Quantities, shapes, classification, and spectra. **Rev. Paleobot. Palynol.**, v. 107, p. 23-53, 1999.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in agronomy**, 1997.

SIGA JUNIOR, O.; CORDANI, U. G.; BASEI, M. A. S.; TEIXEIRA, W.; KAWASHITA, K.; SCHMUS, W. V. Trabalho completo: contribuição ao estudo geológico-geocronológico da porção Nordeste de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA, 4., 1987, Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte, MG, 1987. v. 7. p. 29-44.



SIGA JUNIOR, O. A evolução geotectônica da porção nordeste de Minas Gerais, com base em interpretações geocronológicas. **Revista Brasileira Geociências**, São Paulo, v. 16. p. 422-422, 1987.

SENDULSLTY, T. S.; LABOURIAU, L. G. (Ed.). Corpos silicosos de gramíneas dos cerrados, 1. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 2. 1966. **Anais...** Academia Brasileira de Ciências, v. 38, suplemento, 1966. p. 159-170

SILVA, S. T.; LABOURIAU, L. G. Corpos silicosos de gramíneas dos Cerrados - III. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 5: p. 167-182, 1970.

SNYDER, G. H.; MATICHENKOV, V. V.; DATNOFF, L. E. Silicon. In: Barker A. V.; PILLBEAM, D. J. (Eds). **Handbook of plant nutrition**. New York: Taylor and Francis, p. 551-568, 2007.

STEWART, W. D.; ARTHUR, J. M. An improved standardized method for ashing of plant material. **American Journal of Botany**, v. 22, n. 905, 1935.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R. *et al.* (ed.). **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, cap. 5, p. 420-433, 1995.

TURNAU, K. Metal uptake and detoxification mechanisms in *Erica andevalensis* growing in a pyrite mine tailing. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, n. 2, p. 117-123, 2007.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE; Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. p. 123.

VIEIRA, K. P.; ARAÚJO, C. W.; MAGALHANES, R.; PEREIRA, P. C. Cellular localization of cadmium and structural changes in maize plants grown on a cadmium contaminated soil with and without liming. **Journal of Hazardous Materials**, v. 160, p. 228-234, 2008.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Biogenic opal in Ohio soils. **Soil Science, Society of America Proceedings**, v. 35, n. 6, p. 1004-1010, 1971.

WRANG, S. S.; KIM, K.; HESS, W. M. Variation of silica bodies in leaf epidermal long cells within and among seventeen species of *Oryza* (Poaceae). **Am. J. I of Bot.**, v. 85, n. 4, p. 461-466, 1998.

ZUCOL, A. F. Fitólitos. Uma nueva metodologia descriptiva. Asociaciones fitolíticas de *Piptochaetium montevidense* (Poaceae). **Boletín de la Sociedad Argentina de Botanica**, n. 36, p. 69-85, 2001.